

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК: 621.771.25  
МРНТИ 53.43.31  
№ Госрегистрации 0112РК02875  
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе, к.т.н.  
\_\_\_\_\_ Жаксыбаева Г.Ш.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ  
КАТАНКИ ПРИ МИНИМАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ И  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТАХ  
(заключительный)

по бюджетной программе: 055 «Научная и/или научно-техническая  
деятельность»

по приоритету: Глубокая переработка сырья и продукции

Руководитель темы  
д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_

А.Б. Найзабеков

Темиртау – 2014

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта:  
главный научный сотрудник,  
проф., д.т.н.,

Найзабеков А.Б. (раздел 3,  
заключение)

Ответственный исполнитель:  
ведущий научный сотрудник,  
доц., к.т.н.

Быхин Б.Б. (введение,  
заключение)

Исполнители:

ведущий научный сотрудник,  
доц., к.т.н.

Лежнев С.Н. (раздел 1)

старший научный сотрудник,  
к.т.н.

Ногаев К.А (раздел 2)

научный сотрудник

Айнабекова С.С. (раздел 4)

младший научный сотрудник

Кукимов М.Ж. (раздел 3)

старший мастер

Ахылбеков Ж.З. (раздел 3)

лаборант

Шокенов М.Т. (раздел 4)

лаборант

Набиева Д.Е. (раздел 4)

## РЕФЕРАТ

Отчет содержит 50 страниц, 10 рисунков, 17 таблиц, 9 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: калибр, горячая прокатка, рабочие валки, катанка, эксперимент

Объект исследования – катанка и технология её производства.

Цель этапа исследования: Установление закономерностей формирования структуры и свойств металла при прокатке катанки по новой технологии; получение научно обоснованных технологических режимов нового способа горячей прокатки катанки для выработки рекомендации по внедрению в производство.

Проведены механические испытания и металлографические исследования образцов и установлены закономерности формирования структуры и свойств металла при прокатке катанки по новой технологии.

Проведен анализ энергосиловых параметров процесса прокатки в новой системе калибров «ромб-квадрат».

Разработаны технологические режимы прокатки катанки диаметром 18 мм из малоуглеродистой стали Ст3 с использованием новой системы калибров «ромб-квадрат» для непрерывного сортопрокатного стана 320 АО «АрселорМиттал Темиртау».

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Подготовка и проведение механических испытаний	6
2 Подготовка и проведение металлографических исследований	8
3 Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований	11
3.1 Анализ формирования структуры и свойств катанки, полученных по новой технологии прокатки	11
3.2 Анализ энергосиловых параметров процесса	12
4 Разработка технологических режимов прокатки	16
4.1 Анализ производственно-технологических факторов и постановка задачи	16
4.2 Распределение коэффициентов вытяжки и расчет ориентировочного скоростного режима прокатки	21
4.3 Расчет размеров сечений квадратных калибров	24
4.4 Определение размеров ромбических калибров	25
4.5 Проектирование эскизов калибров валков	35
4.6 Расчет температурного режима прокатки	37
4.7 Выбор типоразмеров валковой проводки и определение их установочных параметров	41
Заключение	45
Список использованных источников	47
Список публикаций по научно-исследовательской работе	48
Приложение А	49
Приложение Б	51

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных этапов при исследовании новых процессов прокатки катанки является обработка и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований. Главная задача этого этапа – уточнение причинно-следственных связей исследуемых параметров процесса или явления.

Для установления закономерностей формирования структуры и свойств металла при прокатке катанки по новой технологии проведены механические испытания и металлографические исследования образцов. Анализ результатов исследования показали, что особенности формирования структуры металла при прокатке новым способом определили и высокие характеристики прочности и пластичности катанки.

Одним из важных этапов разработки и исследования нового способа получения сортового проката является определение и анализ энергосиловых параметров процесса прокатки. Определение усилий прокатки в новой системе калибров проведено с использованием современной системы тензометрических измерений. Сравнительный анализ энергосиловых параметров показал некоторое увеличение их показателей, которое оправдывается существенным улучшением механических свойств металла.

Ценность выполненного исследования определяет разработка рекомендации к практическому применению полученных данных, выполняемая на заключительном этапе.

В заключительном этапе разработаны научно обоснованные технологические режимы прокатки катанки диаметром 18 мм из малоуглеродистой стали Ст3 с использованием новой системы калибров «ромб-квадрат» для непрерывного сортопрокатного стана 320 АО «АрселорМиттал Темиртау».

# 1 ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Основным и наиболее распространенным методом контроля механических свойств металлов являются испытания на статическое растяжение. В процессе этих испытаний определяют следующие механические характеристики металлов: предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, временное сопротивление или предел прочности, истинное сопротивление разрыву, относительное удлинение после разрыва, относительное сужение после разрыва.

Применение метода статических испытаний на растяжение предусматривается в стандартах и технических условиях на большую часть ответственных металлоизделий. Поэтому все существующие методы испытаний на растяжение стандартизованы. В стандартах указываются основные требования к испытательным машинам, необходимые указания о форме и размерах образцов, определения основных понятий механических величин, порядок проведения испытаний и расчета значений механических характеристик.

Для испытания на растяжение использовали образцы из катанок круглого профиля диаметром 11,3 мм, полученных по новой технологии прокатки из стали Ст3. Изготовление образцов осуществляли в механической мастерской университета на металлорежущих станках. Форма и размеры образцов на растяжение назначены по ГОСТ 1497-84.

Испытания образцов на растяжение проводили согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение». Для проведения испытания использовали компьютеризованную универсальную крутильно-разрывную машину МИ-40КУ, предназначенную для исследования материалов на растяжение и сжатие с максимальным усилием 40 кН и кручением максимальным моментом 200 Н·м. Встроенный блок управления машины совместно с компьютером обеспечивает:

- измерение и отображение значения линейных перемещений траверсы и углового перемещения захвата кручения;
- измерение и отображение значения текущей силы и момента;
- установку и отображение скорости линейного перемещения траверсы;
- установку и отображение скорости углового перемещения захвата кручения;
- установку и отображение значения предельного усилия;
- установку и отображение значения предельного момента;
- автоматическую остановку привода при достижении предельной силы;
- автоматическую остановку привода при достижении предельного момента;
- автоматическую остановку привода при достижении конечного положения траверсы;
- построение графика зависимости усилия от деформации;

– построение графика зависимости момента от деформации.

Во время испытания образца сняли диаграмму растяжения, фиксирующую зависимость между действующей на образец силой  $P$ , и вызванной ею деформацией  $\Delta l$  ( $\Delta l$  – абсолютное удлинение).

В ходе механических испытаний определены следующие механические свойства для стали Ст3: предел прочности  $\sigma_B$ , предел текучести  $\sigma_T$ , относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ . Среднестатистические значения механических свойств, полученные после статистической обработки результатов испытаний, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Механические свойства образцов катанки из стали Ст3, полученных по новой технологии

Марка стали	Температура конца прокатки, °С	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Ст3	800	318	445	25	65
	900	311	440	23	63
	950	302	436	21	60

Примечание: Температура нагрева заготовки перед прокаткой - 1100°С.

## 2 ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения макроструктуры и микроструктуры металлов, исследование закономерности образования структуры и зависимостей влияния структуры на механические, физико-механические и другие свойства металла проводится металлографические исследования. Изучение макроструктуры металла обычно проводят на специально подготовленных шлифах.

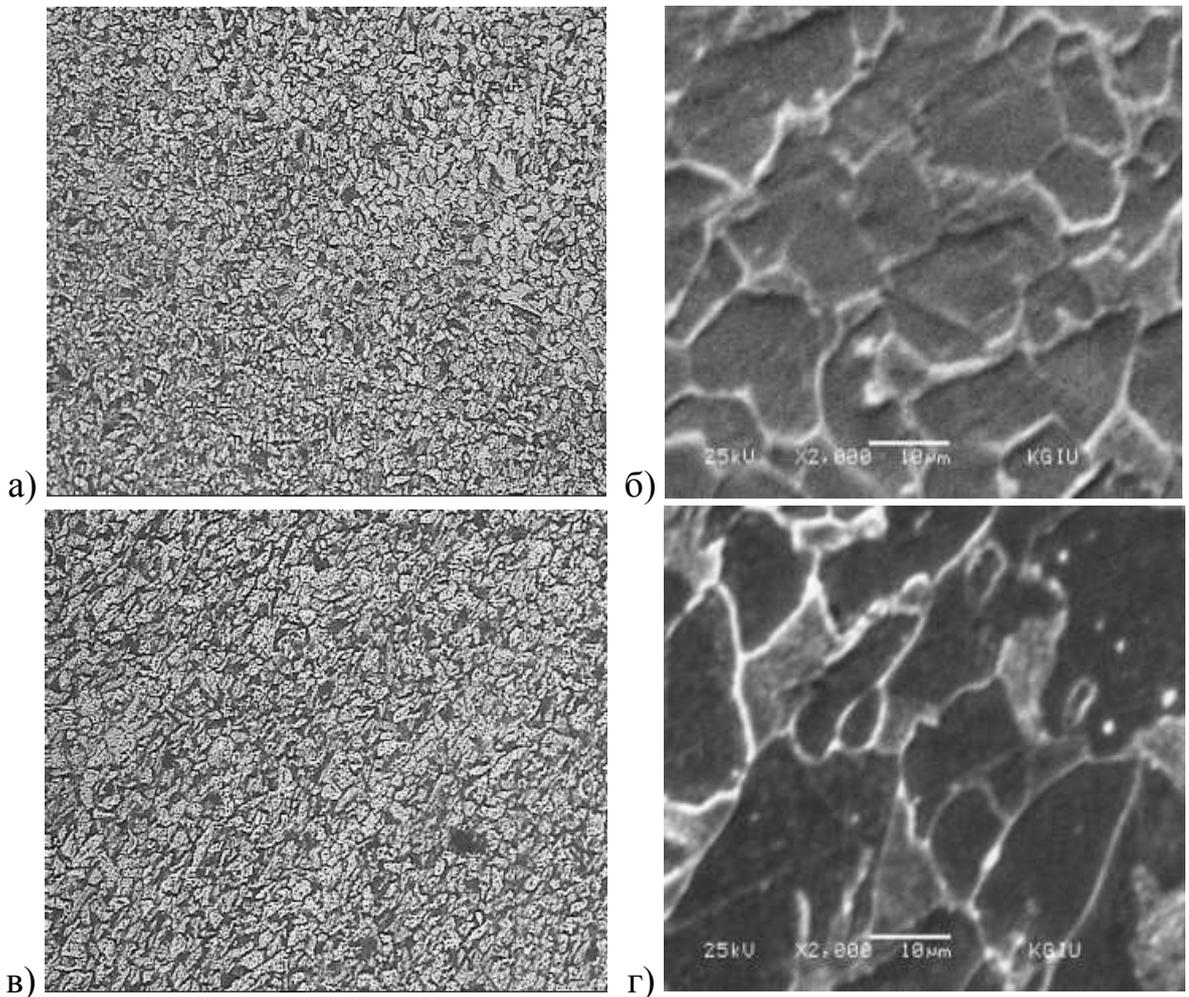
Для подготовки шлифов из катанок круглого профиля диаметром 11,3 мм, полученных по новой технологии прокатки из стали Ст3, на отрезном станке Labotom изготовили образцы для исследования. Поверхность, которую необходимо исследовать, тщательно отшлифовали на шлифовальном станке и наждачной бумагой. После шлифования производили полировку металлографических шлифов с помощью полировально-шлифовального станка Tegra Force для устранения имеющихся неровностей поверхности. Для выявления микроструктуры металла поверхность шлифа подвергали травлению специальным реактивом (5%-й раствор азотной кислоты в спирте).

Макро- и микроструктуру металла на подготовленных шлифах определяли при помощи металлографического микроскопа DM IRM фирмы Leica (Германия) и электронного микроскопа JSM 5910 (Япония). Работу проводили согласно ГОСТ 10243-75 и ГОСТ 5639-82.

В результате металлографических исследований выявлено микроструктура и тонкая электронная структура образцов исходной заготовки (рисунок 2.1) и катанки (рисунки 2.2-2.4), полученной по традиционной и новой технологиям прокатки.

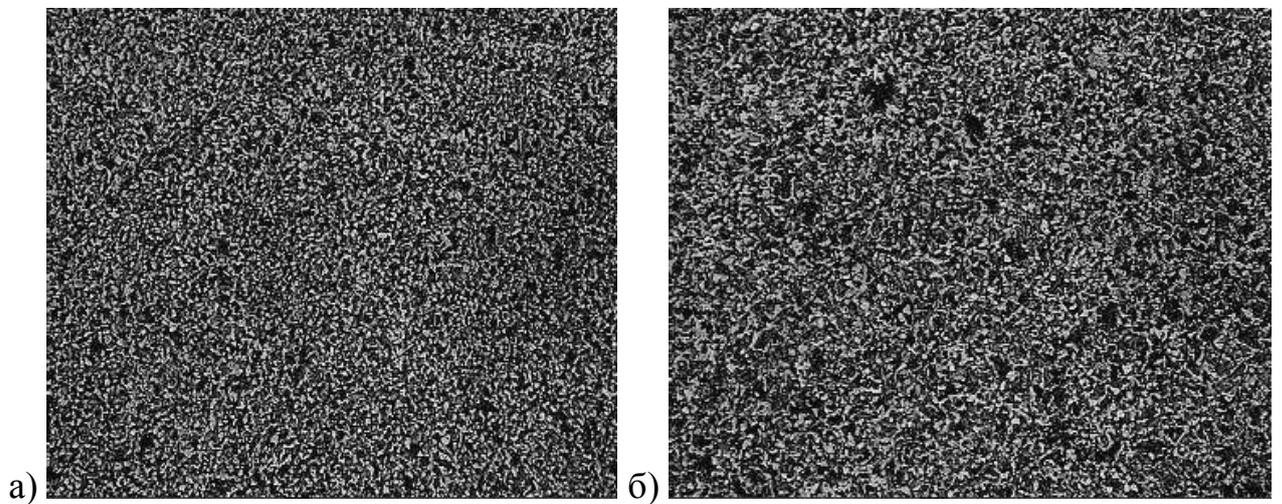


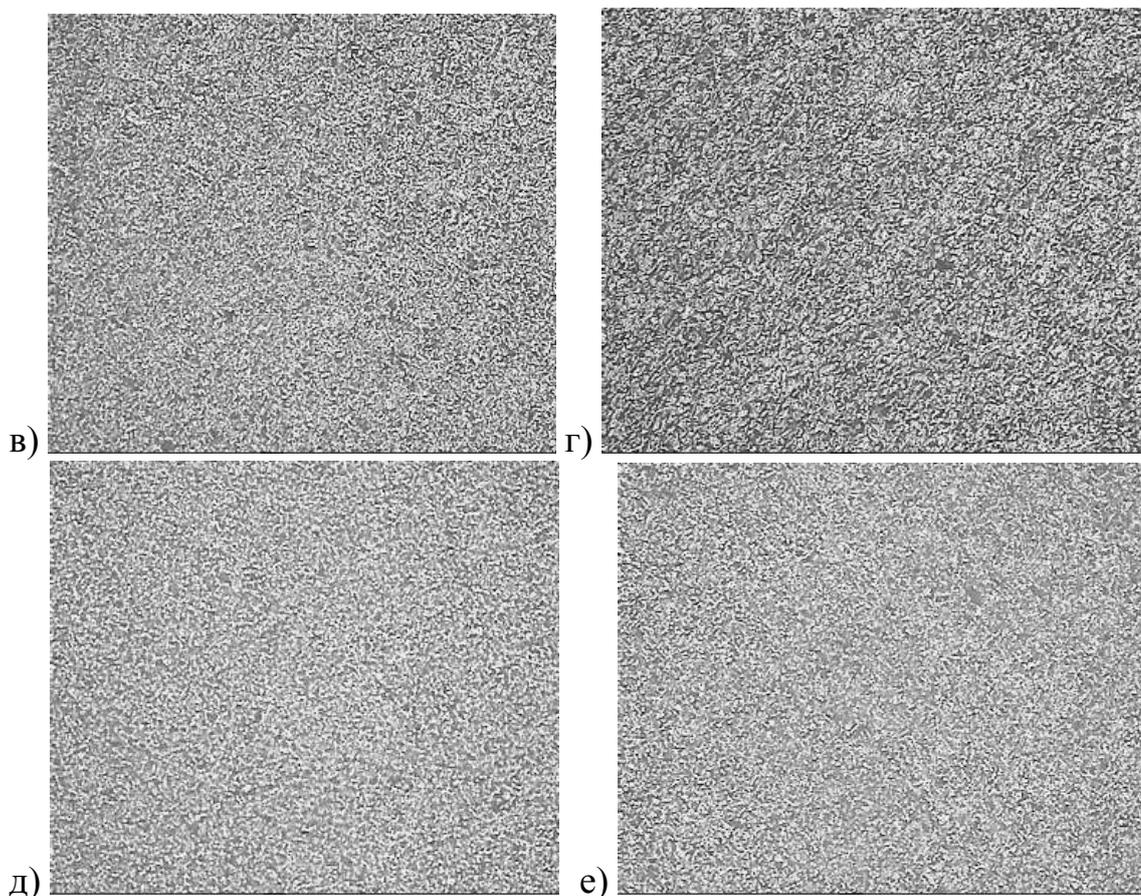
Рисунок 2.1 – Макроструктура исходной заготовки, x20



а, б - поперечное сечение,  $d_{cp}=16$  мкм; в, г – продольное сечение  $d_{cp}=18$  мкм;  
 а, в - оптический микроскоп LEICA, x200; б, г - электронный микроскоп JSM  
 5910, x2000

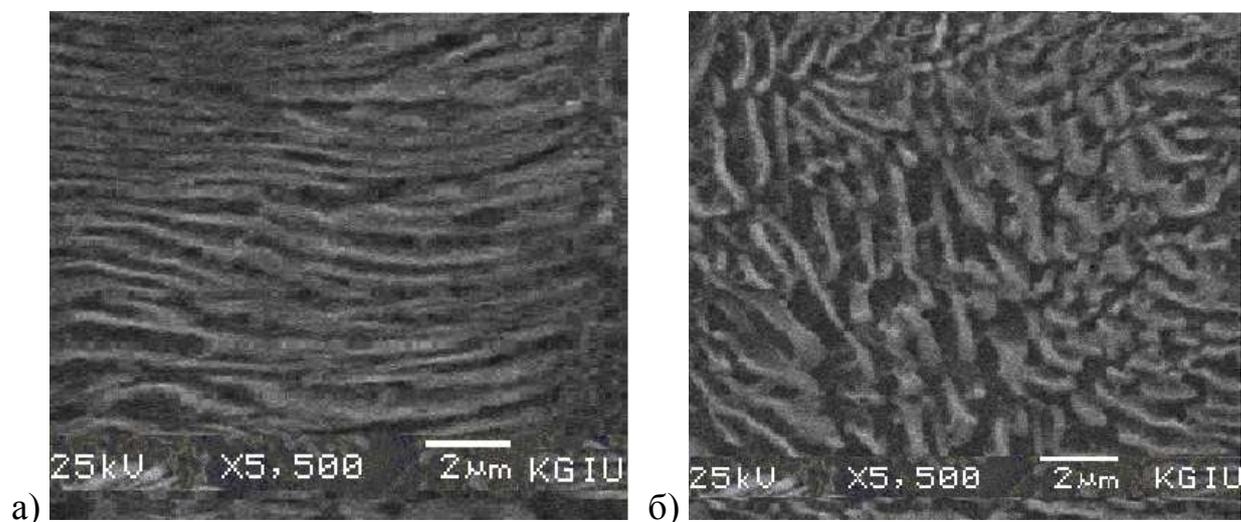
Рисунок 2.2 – Микроструктура и электронная структура катанки, полученной по традиционной технологии





а, в, д - поперечное сечение; б, г, е – продольное сечение;  
а, б - температура конца прокатки  $t_{к.п.}=950^{\circ}\text{C}$ ,  $d_{ср}=15$  мкм; в, г - температура  
конца прокатки  $t_{к.п.}=900^{\circ}\text{C}$ ,  $d_{ср}=12$  мкм; д, е - температура конца прокатки  
 $t_{к.п.}=800^{\circ}\text{C}$ ,  $d_{ср}=9$  мкм

Рисунок 2.3 – Микроструктура катанки, полученной по новой технологии,  $\times 200$



а) катанка, полученная по традиционной технологии,  $\times 5500$ ;  
б) катанка, полученная по новой технологии,  $\times 5500$

Рисунок 2.4 - Сравнительное строение электронных структур при температуре  
конца прокатки  $800^{\circ}\text{C}$  и температуре конца интенсивного охлаждения  $700^{\circ}\text{C}$

## 3 ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1 Анализ формирования структуры и свойств катанки, полученных по новой технологии прокатки

Анализ макроструктуры исходного образца (рисунок 2.1) показывает, что отсутствуют внутренние несплошности по сечению, но четко обнаруживается точечная ликвация - мелкие округлые, сильно травящиеся (матовые) точки, равномерно расположенные по всему сечению образца, за исключением краевой зоны. Точечная ликвация исходного образца составляет 4 балла.

В микроструктуре образцов катанки, полученной по традиционной технологии, структурная составляющая перлит темного цвета более равноосной конфигурации в поперечном направлении (рисунок 2.2, а) по сравнению с продольным направлением (рисунок 2.2, в). Феррит – светлого оттенка расположен в виде окаймляющих перлитные зерна каркасов. Средние размеры зерен металла в поперечном сечении катанки составляет  $D_{ср}=16$  мкм, а в продольном сечении  $D_{ср}=18$  мкм.

Анализ тонкой электронной структуры катанки, полученной по традиционной технологии, показывает, что в поперечном сечении зерна более округлые и равноосные (рисунок 2.2, б), а в продольном сечении проявляется заметная неравноосность зерен, т.е. в направлении прокатки зерна более вытянутые (рисунок 2.2, д).

На рисунках 2.3, а-е представлены микроструктуры образцов катанки, полученные по новой технологии, при различных температурах конца прокатки. При более высоких температурах конца прокатки средний размер зерен получается более крупными. Так, при температуре конца прокатки  $950^{\circ}\text{C}$  средний размер зерен составляет 15 мкм, а при температурах  $900^{\circ}\text{C}$  и  $800^{\circ}\text{C}$  – соответственно 12 и 9 мкм. При этом, измельчение зерен происходит равномерно по всему сечению заготовки, как в поперечном, так и в продольном сечениях, для всех указанных температур конца прокатки. Это обусловлено многократным действием знакопеременной сдвиговой деформации, реализуемой при горячей прокатке в новых калибрах.

На рисунке 2.4 представлена тонкая электронная структура перлитной колонии, полученной по традиционной (рисунок 2.4, а) и новой (рисунок 2.4, б) технологиям прокатки (температура конца прокатки  $800^{\circ}\text{C}$ , температура конца интенсивного охлаждения  $700^{\circ}\text{C}$  с последующим охлаждением на воздухе). Как видно из рисунков перлитная колония катанки при традиционной технологии имеет пластинчатое строение, в то время как при новой технологии прокатки получается более равномерно распределенный цементит в виде дробленных коротких стержней. Такая особенность строения цементита в перлитной колонии при прокатке по новой технологии обусловлена формированием аустенитных зерен под действием значительных сдвиговых компонент деформаций. Последующие фазовые превращения аустенита в феррито-

перлитные составляющие наследуют эти особенности аустенитных зерен. Подобные изменения конечной структуры металла при воздействии интенсивной пластической деформаций (ИПД) описаны в работах [1, 2].

Особенности структуры металла, описанные выше, определяют одновременно и необходимые характеристики прочности и пластичности катанки, полученной по новой технологии, которая в последующем подвергается холодному волочению.

Анализ механических свойств катанки (таблица 1.1), полученной по новой технологии, показывает, что с понижением температуры конца прокатки происходит заметное повышение уровней механических свойств, в особенности пластических характеристик металла. При более высоких температурах конца прокатки пройдут более интенсивные рекристаллизационные процессы, приводящие к укрупнению зерен, что отражается на снижении механических свойств катанки.

Общий уровень показатели катанки, полученной по новой технологии, сравниваем с показателями катанки согласно ГОСТ 30136-94 (ИСО 8457-1-89), требованиям которых соответствует катанки, производимые по традиционной технологии. Согласно данному стандарту для стали марки Ст3 предел прочности в зависимости от различных случаев условий охлаждения после деформации не должен превышать 490 МПа (для первого случая) или 540 МПа (для второго случая), а относительное сужение не ниже 60%. В то время как, по новой технологии при температуре конца прокатки 800°C и температуре конца интенсивного охлаждения 700°C с последующим охлаждением на воздухе предел прочности составляет 445 МПа, а относительное сужение 65%. Увеличение же уровней характеристик пластичности катанки, полученной по новой технологии, можно объяснить, согласно последним исследованиям в области физики ИПД [1], не только с морфологическим строением образовавшегося дробленого цементита в перлитных колониях, но и также резким снижением плотности дефектов в ферритной матрице структуры.

Уровни механических свойств катанки, полученной по новой технологии, благоприятно влияет на технологию последующего волочения проволоки. Так более низкий уровень предела прочности обеспечивает снижения усилия, необходимого для протягивания проволоки в каждом переходе, а более высокий уровень относительного сужения приводит к сокращению общего количества промежуточных отжигов в процессе волочения.

### 3.2 Анализ энергосиловых параметров процесса

Для процесса прокатки энергосиловые условия характеризуются такими динамическими параметрами, как давление, сила, момент, работа и мощность прокатки [3]. Определение энергосиловых параметров составляет одну из главных задач теории прокатки, так как они являются основными критериями, по которым проектируют прокатные станы и разрабатывают технологические процессы. Кроме того, на действующих станах энергосиловые параметры

служат критерием эффективности использования механического и электрического оборудования станов и получения проката с требуемыми свойствами и точностью геометрических размеров.

Экспериментальное определение усилий, действующих в станинах клетки «Дуо-200» при прокатке катанки в новой системе калибров «ромб-квадрат» производили с использованием современной системы тензометрических измерений производства компании ZETLab и датчиков сил сжатия СМ (месдоза) с диапазоном измерения 0,5-100 кН.

При проведении эксперимента датчики сил сжатия СМ устанавливали между нажимными винтами и подушками верхних валков каждой станины клетки Дуо-200 (рисунок 3.1), и подключали напрямую к тензостанции. В ходе прокатки зарегистрировали сигналы из обоих датчиков (рисунок 3.2), показывающие изменения усилий в подушках верхнего валка клетки. Обработка зарегистрированных данных показывает, что при прокатке на первом ромбическом калибре стали марки Ст3, нагретой до температуры 1100°C, значения усилий в правой подушке верхнего валка составило 31400 Н, а в левой - 30500 Н. Усилие прокатки, определяемое как сумма усилий в подушках верхнего валка, составило 61900 Н.

Аналогично определяли усилие прокатки при прокатке в калибрах 2-6. Результаты экспериментального определения усилий прокатки приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты определения усилий прокатки

Номер и тип калибра	Усилие в правой подушке Р, Н	Усилие в левой подушке Р, Н	Усилие прокатки Р, Н
1 - ромбический	31400	30500	61900
2 - квадратный	19800	12400	32200
3 - ромбический	25800	17100	42900
4 - квадратный	22000	3500	25500
5 - ромбический	9000	18000	27000
6 - квадратный	5700	12400	18100

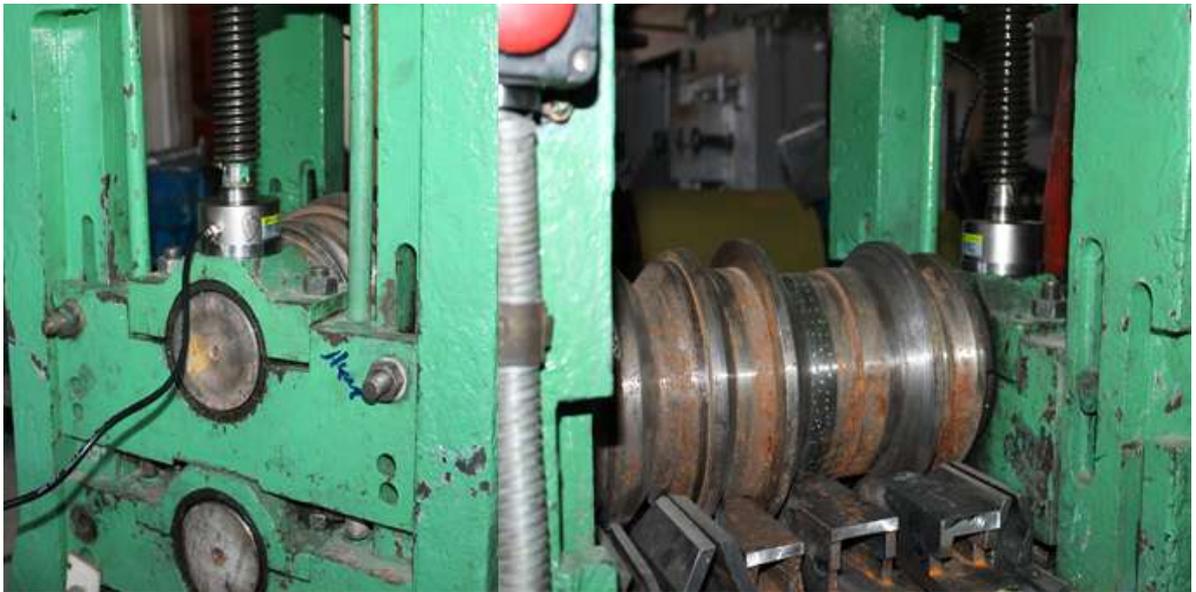


Рисунок 3.1 – Установка датчиков сил на клети ДУО-200

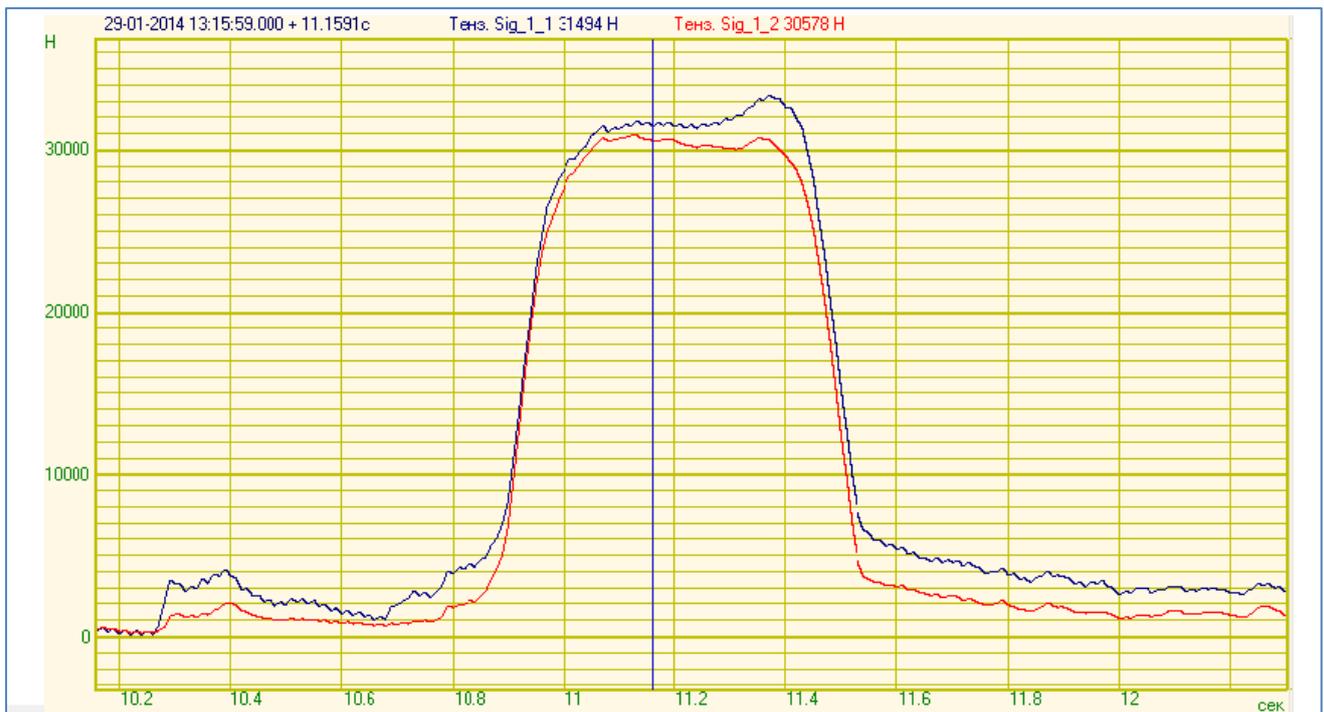


Рисунок 3.2 – Изменение усилий в подушках верхнего валка клети

Неравномерное нагружение станин обусловлено необходимостью размещения 10 калибров на двух клетях для осуществления всех проходов в лабораторных условиях, что привело к несимметричному расположению калибров в валках.

Для сравнения по методике Целикова А.И. [4] определили усилие прокатки в традиционном ромбическом калибре [5, 6], так как основное отличие предлагаемого способа прокатки от традиционного способа заключается в недиагональном расположении предлагаемого ромбического калибра. При этом усилие прокатки в традиционном ромбическом калибре для стали марки Ст3 составило 46820 Н, что на 27% меньше усилий прокатки, чем в

предлагаемом ромбическом калибре. Увеличение усилий при прокатке в предлагаемом ромбическом калибре объясняется тем, что макросдвиговая деформация в поперечном направлении, обжатие в вертикальной плоскости и удлинение в направлении прокатки, обусловленные недиагональным расположением ромба, создает сложное напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и вызывает интенсифицированное движение дефектов, на которое расходуется дополнительная энергия. Такое увеличение энергосиловых параметров в ромбических калибрах, в конечном счете оправдывается получением таких свойств катанки (см. п. 3.1), которые при последующем холодном волочении приводят к снижению суммарных энергетических, материальных и трудовых затрат.

## 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ

### 4.1 Анализ производственно-технологических факторов и постановка задачи

Предлагаемая технология горячей прокатки может быть реализована в промышленных условиях без существенных капитальных затрат и в короткие сроки с использованием имеющихся в наличии на металлургических заводах прокатных станов.

Новый способ прокатки, реализующие интенсивные пластические деформации, рекомендуется использовать для производства катанки иаметром 18 мм на непрерывном сортопрокатном стане АО «АрселорМиттал Темиртау». Осуществление прокатки по предлагаемому способу позволяет получить благоприятные сочетания прочностных и пластических свойств катанки, которые способствует снижению материальных, энергетических и трудовых затрат при последующем холодном волочении проволоки из неё.

Непрерывный сортовой стан 320 предназначен для прокатки мелко и среднесортного проката следующего сортамента:

- сталь горячекатаная круглая диаметром от 14 до 50 мм;
- сталь горячекатаная арматурная от 8 до 32 мм;
- сталь горячекатаная квадратная со стороной квадрата от 12 до 40 мм;
- сталь прокатная угловая равнополочная, номера профилей от 32 до 63 мм;
- сталь прокатная угловая неравнополочная, номера профилей от 45 до 80 мм;
- полоса стальная шириной от 40 до 90 мм;
- швеллер стальной 50 мм, 65 мм, 80 мм;
- тавр стальной 50 мм, 80мм.

Исходным материалом для сортового стана является квадратная заготовка (блюм) номинальным сечением 130 x 130 мм, длиной 12000 мм из спокойных и полуспокойных малоуглеродистых и низколегированных марок сталей.

Непрерывный сортовой стан состоит из следующих основных частей:

- рольганг для транспортировки и задачи заготовки в прокатку;
- черновая группа, состоящая из шести прокатных клеток с горизонтальным и вертикальным расположением;
- предчистовая группа (промежуточная), состоящая из шести прокатных клеток горизонтального, вертикального расположения и с изменяемым положением (конвертируемая клетка) по оси прокатки;
- чистовая группа, состоящая из четырёх прокатных клеток с горизонтальным расположением и с изменяемым положением (конвертируемая клетка) по оси прокатки;
- системы охлаждения и термической обработки сортового проката;
- холодильник для окончательного охлаждения товарного проката.

Краткие технические характеристики оборудования прокатных клетей приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Краткие технические характеристики оборудования прокатных клетей

Наименование параметров	Величина
1	2
<b>оборудование однокалиберных прокатных клетей черновой группы (RR 455-НС)</b>	
минимальное рабочее межосевое расстояние (зазор между валками)	440 мм
максимальное рабочее межосевое расстояние	530 мм
максимальное рабочее межосевое расстояние без нагрузки	550 мм
диаметр бочки валка	400 мм
масса одного валка	972 кг
масса горизонтальной прокатных клетей №№ 1, 3 и 5 в сборе (станина, валки, упорные брусы, трубы систем охлаждения и подачи смазки)	5983 кг
масса вертикальной прокатных клетей №№ 2, 4 и 6 в сборе (станина, валки, упорные брусы, трубы систем охлаждения и подачи смазки)	5990 кг
перемещение валка в клети	360 мм
допустимый диапазон осевого регулирования валка	± 4 мм
десять оборотов ручной настройки привода клети соответствуют осевому смещению	0,39 мм
один поворот нажимных механизмов соответствует открытию зазора между валками на	12 мм
мощность двигателя привода с 1 по 4 клети	400 КВт
мощность двигателя привода 5 и 6 клетей	690 КВт
максимальная скорость двигателя привода с 1 по 4 клети	1700 об/мин
максимальная скорость двигателя привода 5 и 6 клетей	2000 об/мин
давление масла в гидросистеме прокатной клети	6 бар
номинальное давление воды в системе охлаждения валков и проводковой арматуры	3 бар
расход воды	20 м <sup>3</sup> /мин
температура воды	+35 °С
<b>оборудование многокалиберных прокатных клетей предчистовой группы (RR 445-НС)</b>	
минимальное рабочее межосевое расстояние (зазор между валками)	360 мм
максимальное рабочее межосевое расстояние	430 мм
максимальное рабочее межосевое расстояние без нагрузки	445 мм
диаметр бочки валка	650 мм
масса одного валка	870 кг
масса горизонтальных прокатных клетей №№ 7, 9 и 11 в сборе (станина, валки, упорные брусы, трубы систем охлаждения и подачи смазки)	4930 кг
масса горизонтальной прокатной клети № 13 в сборе (станина, валки, упорные брусы, трубы систем охлаждения и подачи смазки)	4930 кг
масса вертикальных прокатных клетей №№ 8 и 10 в сборе (станина, валки, упорные брусы, трубы систем охлаждения и подачи смазки)	5072 кг
масса конвертируемых прокатных клетей №№ 12 и 14 в сборе (станина, валки, упорные брусы, трубы систем охлаждения и подачи смазки)	5072 кг
перемещение валка в клети	675 мм
допустимый диапазон осевого регулирования валка	± 3 мм
десять оборотов ручной настройки привода клети соответствуют осевому смещению	0,32 мм

Продолжение таблицы 4.1

1	2
один поворот нажимных механизмов соответствует открытию зазора между валками на	12 мм
мощность двигателя привода клетей	690 КВт
максимальная скорость двигателя привода 14 клетки	1800 об/мин
максимальная скорость двигателя привода с 7 по 13 клетки	2000 об/мин
давление масла в гидросистеме прокатной клетки	6 бар
номинальное давление воды в системе охлаждения валков и проводковой арматуры	3 бар
расход воды	20 м <sup>3</sup> /мин
температура воды	+35 °С
<b>оборудование многокалиберных прокатных клетей чистовой группы (RR 436-HS)</b>	
минимальное рабочее межосевое расстояние (зазор между валками)	260 мм
максимальное рабочее межосевое расстояние	330 мм
максимальное рабочее межосевое расстояние без нагрузки	345 мм
диаметр бочки валка	500 мм
масса одного валка	400 кг
масса горизонтальной прокатной клетки № 15 в сборе (станина, валки, упорные брусы, трубы систем охлаждения и подачи смазки)	3203 кг
масса конвертируемой прокатной клетки № 16 в сборе (станина, валки, упорные брусы, трубы систем охлаждения и подачи смазки)	3263 кг
перемещение валка в клетях	450 мм
допустимый диапазон осевого регулирования валка	± 3 мм
десять оборотов ручной настройки привода клетки соответствуют осевому смещению	0,36 мм
один поворот нажимных механизмов соответствует открытию зазора между валками на	12 мм
мощность двигателя привода клетей	690 КВт
максимальная скорость двигателя привода клетей	1800 об/мин
давление масла в гидросистеме прокатной клетки	6 бар
номинальное давление воды в системе охлаждения валков и проводковой арматуры	3 бар
расход воды	20 м <sup>3</sup> /мин
температура воды	+ 35 °С

Для реализации предлагаемого способа горячей прокатки на непрерывном сортовом стане 320 АО «АрселорМиттал Темиртау» необходимо произвести определенную технологическую подготовку производства, в которую входят следующие задачи:

- 1) расчет и разработка калибровки валков;
- 2) определение температурного режима прокатки;
- 3) определение установочных параметров валковой арматуры в каждой клетях.

Для решения указанных задач используем методики и рекомендаций, приведенные в работах [3,4,7,8,9].

Для установления новой системы калибровки валков на стане сначала рассмотрим существующую систему, используемой для прокатки круга

диаметром 18 мм (рисунок 4.1). Поступающие в черновую группу клетей исходные заготовки обычно имеют значительные отклонения в размерах от номинального, также прокатка в черновой группе клетей сопровождается значительными искажениями форм и размеров концевых частей раската. Поэтому прокатку, с использованием предлагаемой системы калибров «ромб-квадрат», рекомендуется проводить в промежуточной и чистовой группах клетей, т.е. в клетях 7-14 (рисунок 4.1). Для получения требуемого круглого профиля катанки калибровка чистовых клетей 15-16 остается как при существующей технологии.

Для расчета технологических режимов горячей прокатки катанки на непрерывном сортовом стане 320 принимаем следующие исходные данные:

- исходная заготовка в горячем состоянии имеет размеры  $H_0=B_0=131,8$  мм,  $L_0=28$  м,  $\omega_0=17299$  мм<sup>2</sup>;
- конечный профиль – круглая сталь диаметром  $d_n=18$  мм (DIN488, GOST5781) площадью поперечного сечения  $\omega_n=235,6$  мм<sup>2</sup>;
- марка прокатываемой стали СтЗсп;
- температура нагрева заготовки  $t_0=1140^\circ\text{C}$ .

Группа клеток	Модель клеток	Тип клетки	№ клетки	Существующая система калибровок	Предлагаемая система калибровок
Черновая группа	RR-455-HS	Г	1	Ящный калибр	Ящный калибр
		В	2	Ящный калибр	Ящный калибр
		Г	3	Обол	Обол
		В	4	Круг	Круг
		Г	5	Обол	Обол
		В	6	Круг	Квадрат  Кантовка на 45°
Предчистовая группа	RR-445-HS	Г	7	Обол	Ранб  Кантовка на 26°44'
		В	8	Круг	Квадрат  Кантовка на 45°
		Г	9	Обол	Ранб  Кантовка на 24°43'
		В	10	Круг	Квадрат  Кантовка на 45°
Чистовая группа	RR-445-HS	Г	11	Обол	Ранб  Кантовка на 22°47'
		К	12	Круг	Квадрат  Кантовка на 45°
		Г	13	Обол	Ранб  Кантовка на 20°31'
		К	14	Круг	Квадрат  Кантовка на 45°
	RR-436-HS	Г	15	Обол	Обол
		К	16	Круг  18,22	Круг  18,22

Рисунок 4.1 - Сравнение калибровки валков для производства катанки диаметром 18 мм по существующей и предлагаемой технологиям.

Характеристики клеток непрерывного сортового стана 320, необходимые для расчета технологических режимов горячей прокатки, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристики клеток стана

№ клетки	Диаметр валка, мм		Длина бочки валка, мм	Материал валка	Мощность электродвигателя, кВт	Макс. частота вращения двигателя, об/мин	Передающее число редуктора, $i_p$
	max	min					
1	510	400	400	перлитный литой чугун	435	1700	63,15
2	510	400	400	перлитный литой чугун	435	1700	48,5
3	510	400	400	перлитный литой чугун	435	1700	50,69
4	510	400	400	перлитный литой чугун	435	1700	30,55
5	510	400	400	перлитный литой чугун	780	2000	30,52
6	510	400	400	перлитный литой чугун	780	2000	20,78
7	650	415	650	троситный литой чугун	780	2000	14,01
8	650	415	650	троситный литой чугун	780	2000	10,54
9	650	415	650	троситный литой чугун	780	2000	8,710
10	650	415	650	троситный литой чугун	780	2000	6,170
11	650	415	650	троситный литой чугун	780	2000	4,500
12	650	415	650	троситный литой чугун	780	2000	3,540
13	650	415	650	троситный литой чугун	780	2000	3,910
14	650	415	650	троситный литой чугун	780	2000	3,000
15	500	320	500	троситный литой чугун	780	1800	2,050
16	500	320	500	троситный литой чугун	780	1800	1,580

#### 4.2 Распределение коэффициентов вытяжки и расчет ориентировочного скоростного режима прокатки

Суммарный и средний коэффициент вытяжки по стану  $\lambda_{\Sigma(1-16)}$ , за 16 проходов:

$$\lambda_{\Sigma(1-16)} = \frac{\omega_0}{\omega_{16}}. \quad (4.1)$$

$$\lambda_{\Sigma(1-16)} = \frac{17299}{235,6} = 73,425.$$

$$\ln \lambda_{cp} = \frac{\ln \lambda_{\Sigma cm}}{n_{np}}. \quad (4.2)$$

$$\ln \lambda_{cp} = \frac{\ln 73,425}{16} = 0,269.$$

$$\lambda_{cp cm} = 1,308.$$

Коэффициент вытяжки в квадратном калибре шестой клетки для системы овал-квадрат:

$$\lambda_{oe} = 1 + (1,8 \div 1,3) \cdot (\lambda_{ке} - 1). \quad (4.3)$$

$$\lambda_{ке6} = \frac{\lambda_{oe} - 1}{1,8} + 1.$$

$$\lambda_{кв6} = \frac{\lambda_{ог} - 1}{1,8} + 1.$$

$$\lambda_{кв6} = \frac{1,551 - 1}{1,8} + 1 = 1,306.$$

Средние коэффициенты вытяжки по группам клеток стана:  
а) для черновых клеток 1-6:

$$\lambda_{(1-6)} = 1,3 \cdot 1,3 \cdot 1,531 \cdot 1,436 \cdot 1,551 \cdot 1,306 = 7,526.$$

$$\ln \lambda_{cp(1-6)} = \frac{\ln 7,526}{6} = 0,336.$$

$$\lambda_{cp(1-6)} = 1,4.$$

б) для чистовых клеток 15-16:

$$\lambda_{(15-16)} = 1,118 \cdot 1,443 = 1,613.$$

$$\ln \lambda_{cp(15-16)} = \frac{\ln 1,613}{2} = 0,239.$$

$$\lambda_{cp(15-16)} = 1,27.$$

По известным коэффициентам вытяжек в черновых клетях 1-6 и чистовых клетях 15-16 рассчитываем суммарный и средний коэффициенты вытяжек  $\lambda_{\Sigma(7-14)}$  в клетях с использованием системы квадрат-ромб:

$$\lambda_{\Sigma(7-14)} = \frac{\lambda_{\Sigma(1-6)}}{\lambda_{(1-6)} \cdot \lambda_{(15-16)}}. \quad (4.4)$$

$$\lambda_{\Sigma(7-14)} = \frac{73,425}{7,526 \cdot 1,613} = 6,048.$$

$$\ln \lambda_{cp(7-14)} = \frac{\ln \lambda_{\Sigma(7-14)}}{n_{np}}. \quad (4.5)$$

где  $n_{np}=8$ .

$$\ln \lambda_{cp(7-14)} = \frac{\ln 6,048}{8} = 0,225.$$

$$\lambda_{cp(7-14)} = 1,252.$$

Распределяем коэффициенты вытяжки по клетям таким образом, чтобы выполнялось соотношение (4.5):

$$\lambda_{\Sigma(1-6)} = \lambda_{cp(1-6)}^6 \cdot \lambda_{cp(7-14)}^8 \cdot \lambda_{cp(15-16)}^2. \quad (4.6)$$

$$\lambda_{\Sigma(1-6)} = 1,4^6 \cdot 1,252^8 \cdot 1,27^2 = 73,32,$$

что меньше найденного выше  $\lambda_{\Sigma(1-6)} = 73,425$ . Поэтому соответственно увеличим коэффициент вытяжки в клетях 7:

$$\lambda_{cp7} = 1,253 \cdot \left( \frac{73,425}{73,32} \right) = 1,254.$$

Распределив коэффициенты вытяжки по клетям, рассчитываем площади поперечного сечения калибров:

$$\omega_n = \frac{\omega_{n-1}}{\lambda_n}. \quad (4.7)$$

Результаты расчета приведены в таблице 4.3.

Конечная скорость прокатки катанки из стали Ст3 диаметром 18 мм принимается  $U_{16} = 12,1$  м/с согласно существующей технологии прокатки на данном стане. Рассчитаем ориентировочные скорости прокатки в каждой клетке:

$$U_{i-1} = \frac{U_i}{\lambda_{cpi}}, \quad (4.8)$$

где  $\lambda_{cpi}$  – средний коэффициент вытяжки в каждой клетке.

$$U_{15} = \frac{U_{16}}{\lambda_{16}} = \frac{12,1}{1,443} = 8,39 \text{ м/с.}$$

$$U_{14} = \frac{U_{15}}{\lambda_{15}} = \frac{8,39}{1,118} = 7,5 \text{ м/с.}$$

Аналогично рассчитываем скорости прокатки в остальных клетях. Результаты расчета приведены в таблице 4.3.

Определим приближенные значения катающих диаметров валков:

$$D_{ki} = D_{0i} - \sqrt{\omega_{0i}}. \quad (4.9)$$

$$D_{k14} = 415 - \sqrt{380,22} = 395,5 \text{ мм.}$$

$$D_{k13} = 415 - \sqrt{476,04} = 393,18 \text{ мм.}$$

Результаты расчета приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчета коэффициентов вытяжки, ориентировочного скоростного режима прокатки и значения катающих диаметров валков

Номер клетки	$\omega$ , мм <sup>2</sup>	$\lambda_{cp}$	$\lambda_{сум}$	U, м/с	D <sub>ki</sub> , мм
1 ящичный	13312,3*	1,3	1,69	0,2142	435,9*
2 ящичный	10241*	1,3		0,2785	436,9*
3 овальный	6687,9*	1,531	2,2	0,4264	463,1*
4 круглый	4656,6*	1,436		0,6123	457,5*
5 овальный	3002,9*	1,551	2,025	0,9497	484,6*
6 квадрат	2299,32	1,306		1,2403	462,05
7 ромб	1834,9*	1,2531	1,57	1,5542	372,16
8 квадрат	1467,92	1,25		1,9427	376,7
9 ромб	1171,52	1,253	1,57	2,4342	380,8
10 квадрат	935,721	1,252		3,0477	384,41
11 ромб	746,785	1,253	1,57	3,8187	387,673
12 квадрат	596,47	1,252		4,781	390,577
13 ромб	476,036	1,253	1,57	5,9906	393,182
14 квадрат	380,22	1,252		7,5003	395,501
15 овальный	340*	1,118	1,61	8,3853	310,9*
16 арматура	235,6*	1,443		12,1	309,1*
$\lambda_{\Sigma}$		73,424			

Примечание: Значения со знаком\* взяты без изменения по данным цеховых расчетов

#### 4.3 Расчет размеров сечений квадратных калибров

Находим размеры равноосных (квадратных) сечений в системе калибров «квадрат-ромб», принимая степень заполнения калибров  $\delta=0,9$ .

Геометрические соотношения в квадратном калибре приведены ниже:

- сторона квадрата

$$\frac{\omega}{c^2} = 0,978. \quad (4.10)$$

$$c_6 = \sqrt{\frac{2299,31}{0,978}} = 48,49 \text{ мм.}$$

$$c_8 = \sqrt{\frac{1467,9}{0,978}} = 38,74 \text{ мм.}$$

- теоретическая высота и ширина калибра

$$H' = B_k = \sqrt{2}C. \quad (4.11)$$

$$H'_6 = B_k = \sqrt{2} \cdot 48,49 = 68,57 \text{ мм.}$$

$$H'_8 = B_k = \sqrt{2} \cdot 38,74 = 54,79 \text{ мм.}$$

- радиус закругления в вершине калибра

$$r = (0,1 \div 0,2)C. \quad (4.12)$$

$$r_6 = (0,1 \div 0,2)C_6 = 0,17 \cdot 48,49 = 8,24 \approx 8 \text{ мм.}$$

$$r_8 = (0,1 \div 0,2)C_8 = 0,17 \cdot 38,74 = 6,6 \text{ мм.}$$

- высота калибра с учетом закругления

$$\frac{\omega}{H^2} = 0,603. \quad (4.13)$$

$$H_6 = \sqrt{\frac{2299,31}{0,603}} = 61,75 \text{ мм.}$$

$$H_8 = \sqrt{\frac{1467,92}{0,603}} = 49,34 \text{ мм.}$$

- радиус закругления по буртам

$$r = 0,1H'. \quad (4.14)$$

$$r_6 = 0,1 \cdot 68,57 = 6,859 \approx 7 \text{ мм}$$

$$r_8 = 0,1 \cdot 54,79 = 5,479 \approx 5,5 \text{ мм.}$$

- ширина калибра по врезу

$$B_{ep} = B_k - S. \quad (4.15)$$

$$B_{ep6} = 68,57 - 6 = 63,57 \text{ мм.}$$

$$B_{ep8} = 54,79 - 5,5 = 49,29 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитываем размеры оставшихся квадратных калибров.

#### 4.4 Определение размеров ромбических калибров

Определяем размеры неравноосного сечения раската, расположенного между двумя равноосными сечениями (расчет для 6 и 8 клетки).

Рассчитываем приведенный диаметр валков  $A_1$  в первом против хода прокатки калибре и суммарный коэффициент вытяжки:

$$A_1 = \frac{D_0 - H_1}{H_1}. \quad (4.16)$$

$$A_8 = \frac{415 - 49,34}{49,34} = 7,41.$$

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{\omega_0}{\omega_1}. \quad (4.17)$$

$$\lambda_{\Sigma^{(7-8)}} = \frac{2299,31}{1467,92} = 1,566.$$

По номограмме (рисунок 4.2) при  $A=7,41$  и  $\lambda_{\Sigma}=1,566$  находим  $a=1,5$  и  $\alpha=18^{\circ}$ .

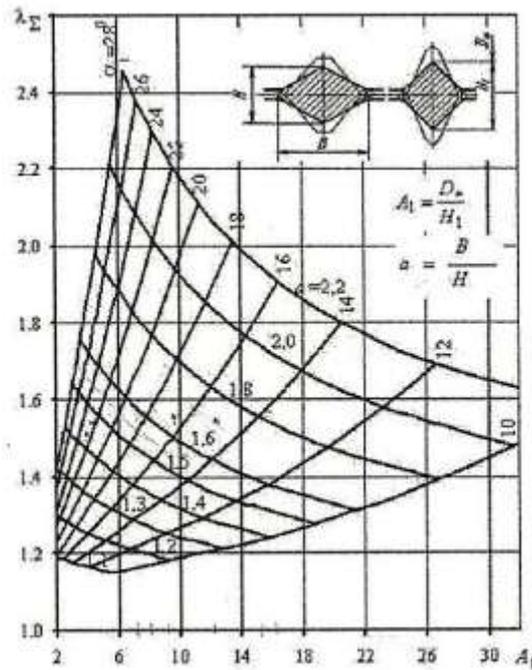


Рисунок 4.2 – Номограмма для определения суммарного коэффициента вытяжки  $\lambda_{\Sigma}$  при прокатке по схеме квадрат-ромб-квадрат

По номограмме (рисунок 4.3) при  $A=7,41$  и  $a=1,5$  определяем  $\frac{1}{\eta} = 1,36$  и  $\lambda=1,13$ .

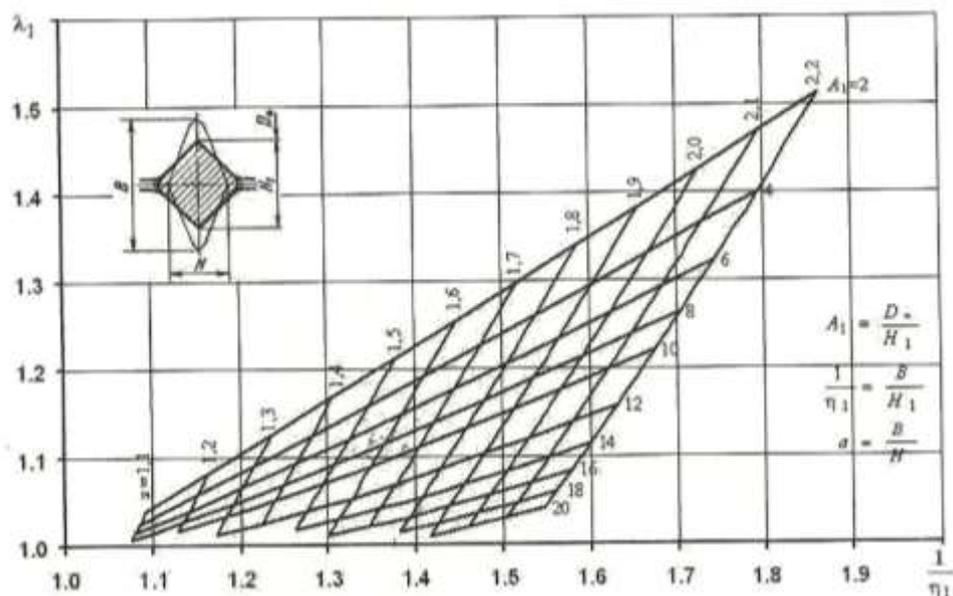


Рисунок 4.3 – Номограмма для определения коэффициента обжатия  $1/\eta$  и коэффициента вытяжки  $\lambda_1$  при прокатке ромбического раската в квадратном калибре

Рассчитываем размеры промежуточного ромбического калибра при степени заполнения  $\delta=0,8$ :

$$B = H_1 \cdot \left(\frac{1}{\eta}\right). \quad (4.18)$$

$$H = \frac{B}{a}. \quad (4.19)$$

$$B_k = \frac{B}{\delta}. \quad (4.20)$$

$$B_7 = 49,34 \cdot 1,36 = 67,1 \text{ мм.}$$

$$H_7 = \frac{67,1}{1,5} = 44,7,3 \text{ мм.}$$

$$B_{k7} = \frac{67,1}{0,8} = 83,88.$$

Определяем коэффициенты вытяжки и обжатия в ромбическом калибре:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_1}. \quad (4.21)$$

$$\lambda_7 = \frac{1,566}{1,13} = 1,386.$$

Произведем уточнённый расчет. Определим коэффициент уширения  $\beta$  в первом проходе против направления прокатки, принимая ориентировочные

значения  $H_{01}=B=67,1$  мм и  $a_{01}=a=1,5$ . Показатель трения при  $t=1090,4^\circ\text{C}$  найдем по формуле:

$$\psi = C_0 \left( \frac{t}{1000} \right)^{C_1}, \quad (4.22)$$

где  $C_0, C_1$  – коэффициенты, принимаем по таблице 4.4:  $C_0=0,768$ ,  $C_1=-2,486$ ;  
 $t$  – температура раската (см. расчет температурного режима прокатки).

$$\psi = 0,768 \cdot \left( \frac{1090,4}{1000} \right)^{-2,486} = 0,62.$$

Таблица 4.4 – Значения коэффициентов для определения показателя трения  $\psi$  при деформации углеродистых, низко- и среднелегированных сталей в валках

Схема прокатки	№ линии	$C_0$	$C_1$
Квадрат-овал, квадрат-плоский овал, квадрат-шестиугольник, круг-овал, ребровой овал-овал, овал-квадрат, овал-круг, плоский овал-круг, шестиугольник-квадрат, овал-ребровой овал, овал-овал, шестиугольник-шестигранник	1	0,856	-1,486
Прямоугольник-ящичный калибр, прямоугольник-гладкие валки	2	0,802	-2,112
Квадрат-ромб, ромб-квадрат	3	0,768	-2,486

Вычисляем коэффициент обжатия:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{H_{01}}{H_1}. \quad (4.23)$$

$$\frac{1}{\eta} = \frac{67,1}{49,34} = 1,36.$$

Найдем коэффициент уширения:

$$\beta_{01} = 1 + C_0 \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)^{C_1} \cdot A^{C_2} a_0^{C_3} a_k^{C_4} \delta_0^{C_5} \psi^{C_6}, \quad (4.24)$$

где  $C_0, C_1, C_2, \dots, C_6$  – коэффициенты, принимаем по таблице 4.5,  $C_0=0,972$ ,  $C_1=2,01$ ,  $C_2=0,655$ ,  $C_3=-2,458$ ,  $C_4=0$ ,  $C_5=-1,3$ ,  $C_6=0,7$ .

$$\beta_1 = 1 + 0,972(1,36 - 1)^{2,01} \cdot 7,41^{0,655} 1,5^{-2,458} 0,8^{-1,3} 0,62^{0,7} = 1,167.$$

Таблица 4.5 – Значение коэффициентов для расчета коэффициента уширения

Схема прокатки	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
Прямоугольник-ящичный калибр	0,0714	0,862	0,746	0,763	-	-	0,16
Квадрат-овал	0,377	0,507	0,316	-	-0,405	-	1,136
Овал-квадрат	2,242	1,151	0,352	-2,234	-	-1,647	1,137
Квадрат-шестиугольник	2,075	1,848	0,815	-	-3,453	-	0,659
Шестиугольник-квадрат	0,948	1,203	0,368	-0,852	-	-3,45	0,629
Квадрат-ромб	3,09	2,07	0,5	-	-4,85	-4,865	1,543
Ромб-квадрат	0,972	2,01	0,665	-2,458	-	-1,3	0,7
Ромб-ромб	0,506	1,876	0,695	-2,220	-2,22	-2,73	0,587
Круг-овал	0,227	1,563	0,591	-	-0,852	-	0,587
Овал-круг	0,386	1,163	0,402	-2,171	-	-1,324	0,616
Овал-овал	0,405	1,163	0,403	-2,171	-0,789	-1,324	0,616
Ребровой овал-овал	1,623	2,272	0,761	-0,582	-3,064	-	0,486
Овал-ребровой овал	0,575	1,163	0,402	-2,171	-4,256	-1,324	0,616
Квадрат-плоский овал	0,134	0,717	0,474	-	-0,507	-	0,357
Плоский овал-круг	0,693	1,286	0,368	-1,052	-	-2,231	0,629
Прямоугольник-гладкие валки	0,0714	0,862	0,555	0,763	-	-	0,455
Круг-гладкие валки	0,179	1,357	0,291	-	-	-	0,511
Шестиугольник-шестигранник	0,3	1,203	0,368	-0,852	-	-3,45	0,629

При найденном коэффициенте  $\beta_1$  уточненное значение ширины ромбического раската до прохода (высоты ромбического калибра) составит:

$$B_{01} = H_y = \frac{B_1}{\beta_1}. \quad (4.25)$$

$$B_{01} = H_y = \frac{49,34}{1,167} = 42,3 \text{ мм.}$$

Рассчитаем коэффициент уширения  $\beta_2$  и ширину ромбического раската  $B_y$  при прокатке исходного квадрата в ромбическом калибре с уточнённой высотой  $H_y=42,3$  мм. Найдем необходимые для этого безразмерные величины:

$$A = A_2 = \frac{D_0 - H_y}{H_y}. \quad (4.26)$$

$$A = A_2 = \frac{415 - 42,3}{42,3} = 8,81.$$

$$\frac{1}{\eta_2} = \frac{H_0}{H_y}. \quad (4.27)$$

$$\frac{1}{\eta_2} = \frac{61,75}{42,3} = 1,46.$$

$$a_k = \frac{B}{H_y \cdot \delta_k}. \quad (4.28)$$

$$a_k = \frac{67,1}{42,3 \cdot 0,8} = 1,98.$$

$$\delta_0 = \frac{H_0}{H_0'}. \quad (4.29)$$

$$\delta_0 = \frac{61,75}{68,57} = 0,9.$$

По формуле (4.24) с коэффициентами  $C_i$  для схемы квадрат-ромб (см. таблицу 4.5) получим:

$$\beta_1 = 1 + 3,09(1,46 - 1)^{2,071} \cdot 8,81^{0,5} 1,98^{-4,85} 0,9^{-4,865} 0,62^{1,543} = 1,053.$$

Уточнённое значение ширины раската в ромбическом калибре составит:

$$B_y = \beta_2 B_0. \quad (4.30)$$

$$B_y = 1,053 \cdot 61,75 = 65 \text{ мм.}$$

Уточнённое значение отношения сторон:

$$a_y = \frac{B_y}{H_y}. \quad (4.31)$$

$$a_y = \frac{65}{42,3} = 1,54.$$

Сравниваем уточненное значение  $B_y$  и ориентировочное  $B$  значения ширины ромбического раската, определяя их сходимость по формуле (4.32):

$$\delta B = \left| \frac{B_y - B}{B} \right|. \quad (4.32)$$

$$\delta B = \left| \frac{65 - 67,1}{67,1} \right| \cdot 100\% = 3,11 > 1\%,$$

т.е. погрешность в определении уширения составила 3%.

Поскольку  $\delta B = 3 > 1\%$ , то примем новые значения  $H$ ,  $B$  и  $a$  по первому приближению, т.е.  $H = H_y = 42,3$  мм,  $B = B_y = 65$  мм,  $a = 1,54$  и повторяем расчет по формулам (4.22-4.32).

$$\frac{1}{\eta} = \frac{B}{H_1} = \frac{65}{49,34} = 1,317.$$

$$\beta_1 = 1 + 0,972(1,317 - 1)^{2,01} \cdot 7,41^{0,655} 1,54^{-2,458} 0,8^{-1,3} 0,62^{0,7} = 1,12.$$

$$B_{01} = H_y = \frac{B_1}{\beta_1} = \frac{49,34}{1,12} = 44 \text{ мм.}$$

$$a_k = \frac{65}{44 \cdot 0,8} = 1,85.$$

$$A = A_2 = \frac{D_0 - H_y}{H_y} = \frac{415 - 44}{44} = 8,43.$$

$$\frac{1}{\eta_2} = \frac{H_0}{H_y} = \frac{61,75}{44} = 1,4.$$

$$\beta_1 = 1 + 3,09(1,4 - 1)^{2,071} \cdot 8,43^{0,5} 1,85^{-4,85} 0,9^{-4,865} 0,62^{1,543} = 1,056.$$

$$B_y = \beta_2 B_0 = 1,056 \cdot 61,75 = 65,2 \text{ мм.}$$

$$a_y = \frac{B_y}{H_y} = \frac{65,2}{44} = 1,48. \text{ (второе приближение)}$$

Сравниваем  $B_y$  и  $B$  по формуле (4.32):

$$\delta B = \left| \frac{65,2 - 65}{65} \right| \cdot 100\% = 0,3 < 1\%,$$

Поскольку  $\delta B = 0,3 < 1\%$ , то итерационный процесс расчетов можно закончить. Произведем дополнительный цикл вычислений для минимизации ошибки, принимая новые значения  $H$ ,  $B$  и  $a$  по первому приближению, т.е.  $H = H_y = 44$  мм,  $B = B_y = 65,2$  мм,  $a = 1,48$  и повторяем расчет по формулам (4.22-4.32).

$$\frac{1}{\eta} = \frac{B}{H_1} = \frac{65,2}{49,34} = 1,32.$$

$$\beta_1 = 1 + 0,972(1,32 - 1)^{2,01} \cdot 7,41^{0,655} 1,48^{-2,458} 0,8^{-1,3} 0,62^{0,7} = 1,137.$$

$$B_{01} = H_y = \frac{B_1}{\beta_1} = \frac{49,34}{1,137} = 43,4 \text{ мм.}$$

$$a_k = \frac{65,2}{43,4 \cdot 0,8} = 1,88.$$

$$A = A_2 = \frac{D_0 - H_y}{H_y} = \frac{415 - 43,4}{43,4} = 8,56.$$

$$\frac{1}{\eta_2} = \frac{H_0}{H_y} = \frac{61,75}{43,4} = 1,42.$$

$$\beta_1 = 1 + 3,09(1,42 - 1)^{2,071} \cdot 8,56^{0,5} 1,88^{-4,85} 0,9^{-4,865} 0,62^{1,543} = 1,057.$$

$$B_y = \beta_2 B_0 = 1,057 \cdot 61,75 = 65,28 \text{ мм.}$$

$$a_y = \frac{B_y}{H_y} = \frac{65,28}{43,4} = 1,5. \text{ (третье приближение)}$$

Сравниваем  $B_y$  и  $B$  по формуле (4.32):

$$\delta B = \left| \frac{65,28 - 65,2}{65,2} \right| \cdot 100\% = 0,12 < 1\%,$$

Поскольку  $\delta B = 0,12 < 1\%$ , то итерационный процесс расчетов можно закончить, приняв окончательные размеры ромбического раската  $H = 43,4$  мм,  $B = 65,28$  мм.

Определим размеры ромбического калибра, используя геометрические соотношения:

- ширина

$$B_k = \frac{B}{\delta}. \quad (4.33)$$

$$B_{k7} = \frac{65,28}{0,8} = 81,6 \text{ мм,}$$

- отношение осей

$$a_k = \frac{B_k}{H}. \quad (4.34)$$

$$a_{k7} = \frac{81,6}{43,4} = 1,88.$$

Радиус скругления в вершине калибра:

$$r = (0,15 \div 0,2)H. \quad (4.35)$$

$$r_7 = (0,15 \div 0,2)43,4 = 6,51 \div 8,68 \text{ мм.}$$

Примем  $r = 8$  мм. Высота калибра с учётом скругления:

$$H' = H - 2r \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{1}{a_k^2}} - 1 \right). \quad (4.36)$$

$$H_7' = 43,4 - 2 \cdot 8 \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{1}{1,88^2}} - 1 \right) = 41,29 \text{ мм.}$$

Вычисляем площадь поперечного сечения ромбического калибра:

$$\omega = H^2 \left[ 0,5a_k \delta (2 - \delta) - 0,43 \left( \frac{r}{H} \right)^2 \right]. \quad (4.37)$$

$$\omega_7 = 43,4 \cdot \left[ 0,5 \cdot 1,88 \cdot 0,8 \cdot (2 - 0,8) - 0,43 \left( \frac{8}{43,4} \right)^2 \right] = 1672,7 \text{ мм}^2.$$

Рассчитываем коэффициенты вытяжки в первом и втором проходах:

$$\lambda_1 = \frac{\omega}{\omega_1}. \quad (4.38)$$

$$\lambda_2 = \frac{\omega_0}{\omega}. \quad (4.39)$$

$$\lambda_1 = \frac{1672,7}{1467,9} = 1,14$$

$$\lambda_2 = \frac{2299,31}{1672,7} = 1,375.$$

Аналогично определяем размеры остальных ромбических калибров. Результаты расчета приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты предварительного расчета калибровки валков стана при прокатке катанки диаметром 18 мм из заготовки сечением 130×130 мм

№ клетки	Калибр	H, мм	B, мм	δ	a <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	1/η	ψ	ω, мм <sup>2</sup>	λ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Ящичный	96*	141,5*	0,9	1,474	4,313	1,373	0,647	13312,3*	1,3
2	Ящичный	95*	110*	0,9	1,158	4,368	1,489	0,656	10241*	1,3
3	Овальный	60,5*	118,5*	0,9	1,959	7,43	1,818	0,748	6687,9*	1,531
4	Круглый	77*	77*	0,9	1	5,623	1,539	0,748	4656,6*	1,436

Продолжение таблицы 4.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	Овальный	40,5*	94*	0,8	2,321	11,59	1,901	0,748	3002,9*	1,551
6	Квадратный	61,75	61,75	0,9	1	7,259	1,522	0,746	2299,31	1,306
7	Ромбический	43,41	65,28	0,8	1,504	8,56	1,422	0,62	1672,71	1,3746
8	Квадратный	49,34	49,34	0,9	1	7,411	1,323	0,619	1467,92	1,139
9	Ромбический	33,88	52,57	0,8	1,552	11,25	1,456	0,62	1053,21	1,394
10	Квадратный	39,39	39,39	0,9	1	9,535	1,335	0,62	935,72	1,126
11	Ромбический	26,43	42,33	0,8	1,602	14,7	1,49	0,622	660,62	1,416
12	Квадратный	31,45	31,45	0,9	1	12,2	1,346	0,622	596,47	1,108
13	Ромбический	20,52	34,11	0,8	1,662	19,22	1,533	0,626	413,23	1,443
14	Квадратный	25,11	25,11	0,9	1	15,53	1,358	0,624	380,22	1,087
15	Овальный	13,5*	30*	0,9	2,19	22,36	1,439	0,755	340*	1,118
16	Круглый	17,32*	17,32*	0,9	1	17,48	1,732	0,756	235,6*	1,443

Примечание: Значения со знаком \* взяты без изменения по данным сортопрокатного цеха

Как видно из таблицы 4.6, в клетях, где осуществляется прокатка по схеме квадрат-ромб-квадрат при фиксированной степени заполнения ромбического калибра  $\delta=0,8$  получилось неравномерное распределение коэффициентов вытяжки между проходами:  $\lambda_7=1,3746$  и  $\lambda_8=1,139$ ;  $\lambda_9=1,394$  и  $\lambda_{10}=1,126$ ;  $\lambda_{11}=1,416$  и  $\lambda_{12}=1,108$ ;  $\lambda_{13}=1,443$  и  $\lambda_{14}=1,087$ . Для уменьшения неравномерности распределения коэффициентов вытяжки сделали уточнённый расчет формоизменения металла по формулам (4.18-4.32), изменяя степени заполнения ромбического калибра  $\delta$  без изменения размеров равноосных сечений. Результаты расчета приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты уточненного расчета калибровки валков стана при прокатке катанки диаметром 18 мм из заготовки сечением 130×130 мм.

№ клетки	Калибр	H, мм	B, мм	$\delta$	$a_1$	$A_1$	$1/\eta$	$\psi$	$\omega$ , мм <sup>2</sup>	$\lambda$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Ящичный	96*	141,5*	0,9	1,474	4,313	1,373	0,647	13312,3*	1,3
2	Ящичный	95*	110*	0,9	1,158	4,368	1,489	0,656	10241*	1,3
3	Овальный	60,5*	118,5*	0,9	1,959	7,43	1,818	0,748	6687,9*	1,531
4	Круглый	77*	77*	0,9	1	5,623	1,539	0,748	4656,6*	1,436
5	Овальный	40,5*	94*	0,8	2,321	11,59	1,901	0,748	3002,9*	1,551
6	Квадратный	61,75	61,75	0,9	1	7,259	1,522	0,746	2299,311	1,306
7	Ромбический	43,32	64,5	0,75	1,489	8,56	1,422	0,62	1718,838	1,338
8	Квадратный	49,34	49,34	0,9	1	7,411	1,323	0,619	1467,919	1,171
9	Ромбический	33,73	51,28	0,7	1,52	11,25	1,456	0,62	1108,727	1,324
10	Квадратный	39,39	39,39	0,9	1	9,535	1,335	0,62	935,7214	1,185

Продолжение таблицы 4.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	Ромбический	26,18	40,73	0,65	1,555	14,7	1,49	0,622	709,0923	1,32
12	Квадратный	31,45	31,45	0,9	1	12,2	1,346	0,622	596,4735	1,189
13	Ромбический	20,18	32,35	0,6	1,603	19,22	1,533	0,626	450,1391	1,325
14	Квадратный	25,11	25,11	0,9	1	15,53	1,358	0,624	380,2207	1,184
15	Овальный	13,5*	30*	0,9	2,19	22,7	1,439	0,755	340*	1,118
16	Круглый	17,32*	17,32*	0,9	1	17,48	1,732	0,756	235,6*	1,443

Примечание: Значения со знаком \* взяты без изменения по данным сортопрокатного цеха

#### 4.5 Проектирование эскизов калибров валков

На основании проведенных расчетов определены геометрические размеры калибров по группам клеток, которые приведены в таблицах 4.8-4.10.

Таблица 4.8 - Геометрические размеры калибров клеток 1-5

№ клетки	Калибр	В <sub>д</sub> , мм	В <sub>вр</sub> , мм	R, мм	г, мм	φ, °	tgφ, рад	H, мм	В <sub>к</sub> , мм	S, мм	A
1	Ящичный	130	152	12	10	16,15	0,29	96	157,8	20	4,31
2	Ящичный	96	116	13	10	14,933	0,267	95	121,3	20	4,37
3	Овальный	113,9	130	200	8	25	-	60,5	134,4	9,5	7,43
4	Круглый	-	82,6	38,5	10	27,5	0,887	77	86,81	8	5,62
5	Овальный	-	105,3	90	12	-	-	40,5	113,8	6,5	11,6

Таблица 4.9 - Геометрические размеры калибров клеток 6-14

№ клетки	Калибр	w, мм <sup>2</sup>	c, мм	В <sub>к</sub> , мм	w/H <sup>2</sup>	H, мм	B, мм	г, мм	г', мм	δ
6	Квадратный	2299,3	48,487	68,57	0,603	61,75	61,75	8	7	0,9
7	Ромбический	1718,8	-	86	-	43,32	64,5	8	6	0,75
8	Квадратный	1467,9	38,742	54,79	0,603	49,34	49,34	6,5	5,5	0,9
9	Ромбический	1108,7	-	73,26	-	33,73	51,28	6	5	0,7
10	Квадратный	935,72	30,932	43,74	0,603	39,39	39,39	5	4	0,9
11	Ромбический	709,09	-	62,66	-	26,19	40,73	5	4	0,65
12	Квадратный	596,47	24,696	34,93	0,603	31,45	31,45	4	3,5	0,9
13	Ромбический	450,14	-	53,91	-	20,18	32,35	4	3	0,5
14	Квадратный	380,22	19,717	27,88	0,603	25,11	25,11	3	3	0,9

Таблица 4.10 – Геометрические размеры чистовых калибров

№ клетки	Калибр	В <sub>вр</sub> , мм	R, мм	г, мм	H, мм	В <sub>к</sub> , мм	S, мм	A
15	Овальный	30	7,5	2	13,5	30,93	3	22,7
16	Круглый	17,32	8,66	2,2	17,32	121,3	2,7	17,48

По полученным размерам проектированы чертежи калибров (рисунок 4.4).

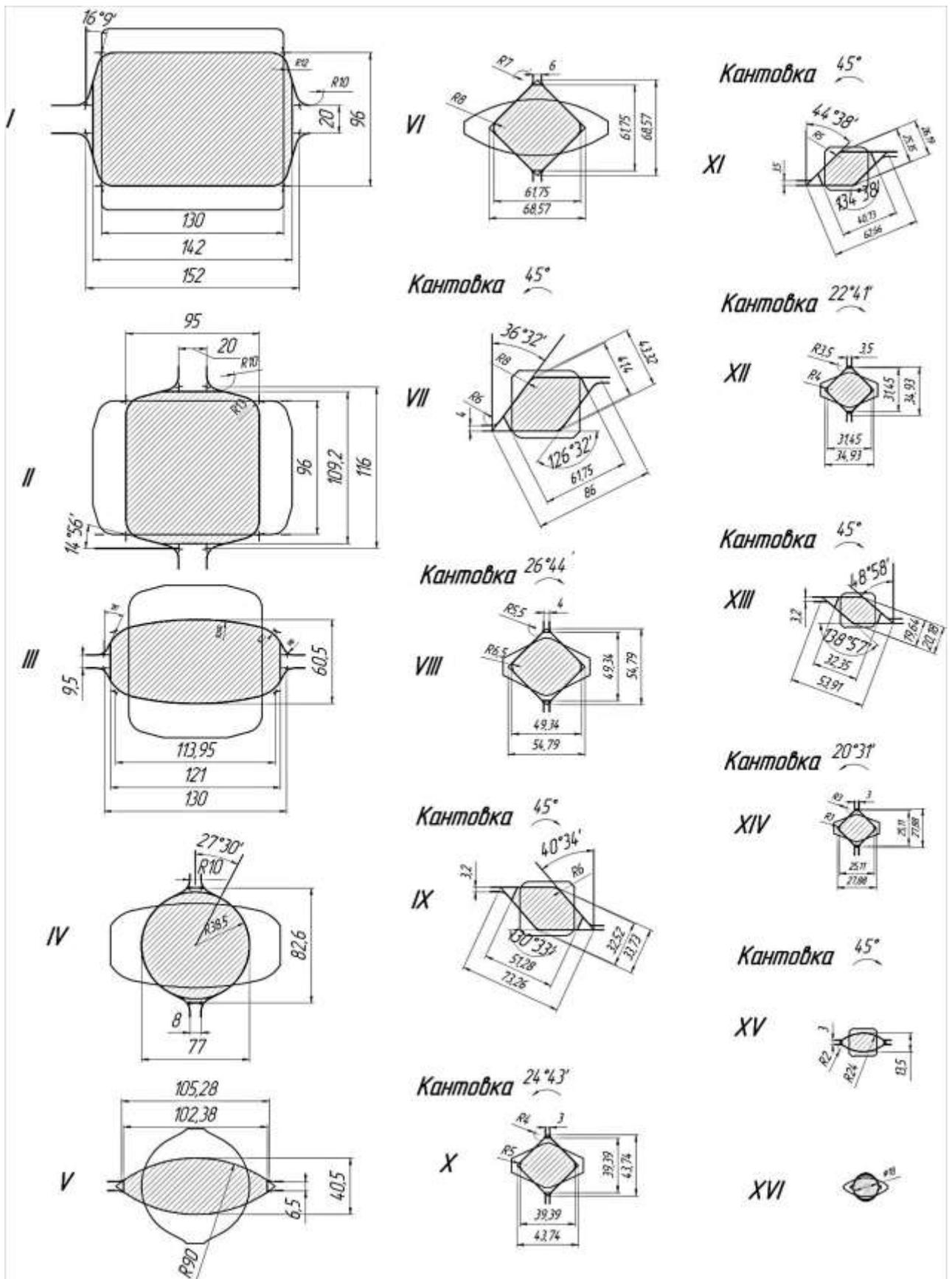


Рисунок 4.4 – Новая система калибровки валков для получения катанки диаметром 18 мм

#### 4.6 Расчет температурного режима прокатки

Рассчитаем температуру переднего конца заготовки перед первой клетью, учитывая её охлаждение за время  $\tau_0=34$ с транспортировки от печи до первой клетки стана. Расстояние от печи до первой клетки  $L_p=28,105$ м. Периметр и площадь поперечного сечения заготовки равны:

$$\begin{aligned}P &= 2(H_0 + B_0), \\P &= 2(131,8 + 131,8) = 527,2 \text{ мм.} \\ \omega_0 &= 17299 \text{ мм}^2.\end{aligned}\tag{4.40}$$

Температура нагрева заготовки  $t_0=1140^\circ\text{C}$ , а перед первым проходом  $\Delta t_d=0$ . Понижение температуры за время  $\tau_0$ :

$$\Delta t = t_0 - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,025 \cdot P \tau}{\omega} + \left(\frac{1000}{t_0 + \Delta t_d + 273}\right)^3}} + 273,\tag{4.41}$$

где  $t_0$  – температура раската перед входом в рассматриваемый калибр,  $^\circ\text{C}$ ;

$P$  – периметр поперечного сечения раската после прохода, мм;

$\omega$  – площадь поперечного сечения раската после прохода,  $\text{мм}^2$ ;

$\tau$  – время охлаждения раската при перемещении от рассматриваемого калибра к следующему калибру, с;

$\Delta t_d$  – повышение температуры раската в рассматриваемом калибре,  $^\circ\text{C}$ .

Величина  $\Delta t_d$  определяется по формуле:

$$\Delta t_d = 0,183 \sigma \ln \lambda,\tag{4.42}$$

где  $\sigma$  – сопротивление металла деформации, МПа.

$$\Delta t = 1140 - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,025 \cdot 527,2 \cdot 34}{17299} + \left(\frac{1000}{1140 + 273}\right)^3}} + 273 = 32,89^\circ\text{C}.$$

Следовательно, температура переднего конца заготовки перед первым проходом составит:

$$\begin{aligned}t_1 &= t_0 - \Delta t. \\t_1 &= 1140 - 32,83 = 1107,17^\circ\text{C}.\end{aligned}\tag{4.43}$$

Рассчитаем температуру переднего конца раската перед второй клетью. Для расчета средней степени деформации при прокатке по различным схемам используем формулы из таблицы 4.11.

Таблица 4.11 – Формулы для определения средней степени деформации  $\varepsilon$  при прокатке по различным схемам

Схема прокатки		Формула
Прямоугольник-ящичный калибр, шестиугольник-квадрат, шестиугольник-шестигранник, овал-квадрат, плоский овал-круг, прямоугольник-гладкие валки		$\frac{H_0 - H_1}{H_0}$
Квадрат-ромб, ромб-квадрат, ромб-ромб, круг-овал, овал-круг, овал-овал, круг-гладкие валки		$\frac{2}{3} \frac{H_0 - H_1}{H_0}$
квадрат-овал		$1 - \frac{H_1}{H_0} (1,16 - 0,2\delta_1)$
квадрат-плоский овал	$\left\{ \frac{H_0 - H_1}{H_0} \left[ 1 + \left[ 0,031 \left( \frac{H_0}{a_k - 1} - 0,3 \right)^2 - 0,01 \left( \frac{H_0}{H_1} \right)^2 - 0,027 \left( \frac{H_1}{a_k - 1} - 0,5 \right)^2 \right] \right\}$	

Средняя степень деформации для ящичного калибра в 1-й клетке:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \quad (4.44)$$

$$\varepsilon = \frac{131,8 - 96}{131,8} = 0,27.$$

Частота вращения валков при скорости прокатки  $U_1=0,21$  м/с:

$$n_1 = \frac{60 \cdot U}{\pi \cdot D_k} \quad (4.45)$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot 0,21}{3,14 \cdot 0,4359} = 9,4 \text{ об/мин.}$$

Для клеток 6-14 вместо  $D_k$  используем  $D^*=D_0-H_1$ .

Средняя скорость деформации равна:

$$u = 0,105n \sqrt{\frac{\varepsilon D^*}{2 \cdot H_0}} \quad (4.46)$$

$$u = 0,105 \cdot 9,4 \sqrt{\frac{0,27 \cdot 435,9}{2 \cdot 131,8}} = 0,66 \text{ с}^{-1}.$$

При найденных значениях  $\varepsilon=0,27$ ,  $u=0,66\text{с}^{-1}$  и  $t=1140^\circ\text{C}$  для стали Ст3 по справочнику определяем термомеханические коэффициенты  $k_\varepsilon=1,3$ ,  $k_u=0,68$ ,  $k_t=0,75$ , а базовое сопротивление деформации  $\sigma_{o.d.}=90,7$  МПа.

Рассчитаем сопротивление металла деформации:

$$\sigma = \sigma_{o.d.} \cdot k_t \cdot k_u \cdot k_\varepsilon. \quad (4.47)$$

$$\sigma = 90,7 \cdot 0,75 \cdot 0,68 \cdot 1,3 = 60,13 \text{ МПа.}$$

Определяем приращение температуры при прокатке в 1-й клетки:

$$\Delta t_\delta = 0,183 \cdot 60,13 \cdot \ln 1,3 = 2,89^\circ\text{C}.$$

Время охлаждения раската при движении от 1-й до 2-й клетки определим при  $L_{k1}=2$  м и  $U=0,21$  м/с

$$\tau = \frac{2}{0,21} = 9,52 \text{ с.}$$

Периметр поперечного сечения раската в первом проходе:

$$P = 2 \cdot (96 + 141,5) = 475$$

С учётом найденных значений  $\tau$ ,  $P$  и  $\Delta t_\delta$  получим общее изменение температуры переднего конца раската после первого прохода:

$$\Delta t = 1107,17 - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,025 \cdot 475 \cdot 9,52}{13312,3} + \left(\frac{1000}{1107,17 + 2,89 + 273}\right)^3}} + 273 = 7,12^\circ\text{C}.$$

Температура раската перед вторым проходом составит:

$$t_2 = 1107,17 - 7,12 = 1100^\circ\text{C}.$$

Результаты расчета температуры раската в остальных проходах приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Расчет температурного режима прокатки

№ клетки	$t_0, ^\circ\text{C}$	$U, \text{ м/с}$	$L, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$\Pi_0, \text{ мм}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$	$U, \text{ с}^{-1}$	$k_t$	$k_\varepsilon$	$k_u$	$\sigma, \text{ МПа}$	$\Delta t_d, ^\circ\text{C}$
-	1140	2,2	28,105	34	527,2	32,83							
1 клеть	1107,17	0,214	2	9,336	475	7,123	0,272	0,661	0,75	1,3	0,68	60,134	2,887
2 клеть	1100,04	0,279	2	7,181	410	5,276	0,329	0,911	0,76	1,33	0,73	66,926	3,213
3 клеть	1094,77	0,426	2	4,691	275,12	-0,474	0,461	1,82	0,77	1,45	0,78	78,988	6,157
4 клеть	1095,24	0,612	2	3,266	241,78	0,432	0,233	1,803	0,77	1,23	0,8	68,722	4,551
5 клеть	1094,81	0,95	2	2,106	209,98	-2,226	0,316	3,859	0,76	1,32	0,9	81,891	6,577
6 клеть	1097,04	1,24	6,15	4,959	174,66	6,832	0,343	5,021	0,76	1,35	0,92	85,614	4,183
7 клеть	1090,2	1,819	2,2	1,209	155,4	-0,255	0,199	6,492	0,77	1,2	0,93	77,94	3,218
8 клеть	1090,46	1,943	2,7	1,39	139,55	0,589	0,157	7,104	0,77	1,18	0,96	79,114	3,231
9 клеть	1089,87	2,848	3,4	1,194	122,75	0,11	0,211	11,56	0,78	1,2	1	84,895	3,504
10 клеть	1089,76	3,048	4,1	1,345	111,42	1,016	0,155	12,25	0,78	1,18	1,05	87,654	3,605
11 клеть	1088,74	4,463	4,5	1,008	96,836	-0,118	0,224	20,7	0,78	1,21	1,1	94,163	3,886
12 клеть	1088,86	4,781	7,5	1,569	88,957	2,838	0,152	21,15	0,78	1,19	1,12	94,29	3,878
13 клеть	1086,02	7,056	4,5	0,638	76,254	-1,437	0,239	37,28	0,79	1,21	1,22	105,77	4,366
14 клеть	1087,46	7,5	5	0,667	71,024	-0,803	0,149	36,59	0,79	1,2	1,24	106,62	4,385
15 клеть	1088,26	8,385	5	0,596	67,831	0,615	0,329	85,83	0,79	1,32	1,45	137,14	2,799
16 клеть	1087,65	12,1	0	0	54,385	-9,127	0,282	94,63	0,79	1,3	1,46	136	9,127

Как видно из результатов расчета режимов прокатки по новой технологии, температура конца прокатки составляет 1088°C. Такой уровень температуры конца прокатки обуславливает прохождение собирательной рекристаллизации с укрупнением зерен и соответствующим снижением характеристик механических свойств. Для подавления возможностей прохождения собирательной рекристаллизации и получения мелкозернистой структуры в готовом прокате на стане 320 используют термическое упрочнение с охлаждением до разных уровней температур катанки (600-800°C) с последующим охлаждением на воздухе. При внедрении предлагаемой технологии необходимо принять меры по снижению температуры конца прокатки до 800-900°C с последующим ускоренным охлаждением до уровней температур 750°C. В результате в готовом прокате формируется те же сочетания уровней прочностных и пластических, которые были достигнуты нами в ходе экспериментальных исследований.

Кроме того после внедрения, рекомендуемого для стана 320, технологического режима прокатки в соответствии с новой технологией возможно оптимизировать технологию путем сокращения общего количества проходов на стане за счет устранения первых четырех черновых проходов, в которых прокатка производится по традиционной технологии. Такая мера в принципе не отразится на конечных свойствах катанки, но позволяет снизить материальные, энергетические и трудовые затраты на горячую прокатку, за счет сокращения количества используемых валков, устранения расхода электроэнергии на приводе черновых клетей и трудовых расходов на эксплуатацию этих клетей. А также при этом возможно осуществить одновременную двухниточную прокатку из заготовок меньшего сечения (100x100 мм), которая позволит соответственно увеличить производительность стана по сравнению с действующей технологией прокатки из одной заготовки.

#### 4.7 Выбор типоразмеров валковой проводки и определение их установочных параметров

Прокатка в предлагаемой системе калибров «ромб-квадрат» (рисунок 4.4), в отличие от существующей, сопровождается кантовкой раската между клетями 6-15, что требует применения соответствующих конструкции валковой арматуры и определения их параметров. В соответствии с этим необходимо установить полный угол кантования раската между клетями, учитывая схемы расположения профилей раската на выходе из предыдущей клетки и перед входом в последующую клетку (рисунок 4.4), и выбрать соответствующие типоразмеры роликовых кантующих проводок с учетом формы и размеров сечений раската.

С учетом расположения рабочих клетей и других вспомогательных оборудования, расположенных в межклетевых пространствах существующей линии прокатки, при заданном значении полных углов кантования между клетями, определяем первоначальные углы кантования металла кантующими

роликами и установочные параметры валковой арматуры для клеток 6-14. В клетях 1-5, 15 и 16 калибры аналогичны калибрам существующей технологии, в связи с этим установленные в этих клетях валковые арматуры оставим без изменения.

Рассмотрим выбор типоразмеров валковой проводки для клетки №6 и определение их установочных параметров.

а) Вводная проводка.

Из клетки №5 подается профиль (овал,  $R = 90$  мм,  $H = 40,5$  мм), получаемый аналогично существующей технологии, в связи с чем установленную вводную 2-х роликовую моноблочную проводку 2E7L (фирма ASHLOW) оставим без изменения.

б) Выводная проводка

Получаемый в клетки №6 квадратный раскат размерами  $48,5 \times 48,5$  мм необходимо кантовать на  $45^\circ$ .

В клетях стана 320 применяются роликовые кантующие проводки RS2NO, RS3NLO и RS3.5NO (фирма ASHLOW). Размеры проводок, характеризующие их пропускные способности, приведены в таблице 4.13. При этом максимальный раствор роликов определяется по формуле:

$$h_{p\max} = a_{p\max} - d_{p\min}, \quad (4.47)$$

где  $a_{p\max}$  - максимальное межосевое расстояние роликов, мм;

$d_{p\min}$  - минимальный диаметр роликов, мм.

Таблицы 4.13 – Размеры роликовых кантующих проводок RS2NO, RS3NLO и RS3.5NO

Тип проводки	Ширина ролика, мм	Диаметр ролика, мм		Межосевое расстояние, мм		Раствор ролика, мм
		max	min	max	min	
RS2NO	80	57	45	63	53	18
RS3NLO	100	70	52	84	72	32
RS3.5NO	100	92	67	104	92	37

Характеристики проводок RS2NO, RS3NLO и RS3.5NO, приведенные в таблице 4.13, показывают не возможность их использования для кантовки квадратного раската размерами  $48,5 \times 48,5$  мм.

Рассмотрим характеристики аналогичных кантующих проводок серии RTC производства фирмы MORGÅRDSHAMMAR (таблица 4.14).

Таблица 4.14 – Пропускные характеристики кантующих проводок серии RTC

Форма и предельные размеры раската, мм		Типоразмер							
		1	3	5	7	10	12	15	18
	min	8	15	23	36	50	68	90	120
	max	27	40	56	80	105	140	180	200
	min	8	15	23	36	50	68	90	120
	max	27	40	56	80	105	140	180	200
	min	8	15	23	36	50	68	90	120
	max	27	40	56	80	105	140	180	200
	min		8	15	25	35	48	65	85
	max		20	28	40	55	73	95	125

По характеристикам, приведенным в таблице 4.14, рекомендуется роликовая кантующая проводка RTC10, параметры которой подходит для кантовки квадратного раската размерами 48,5×48,5 мм.

в) Определение установочных и геометрических параметров валковой арматуры

Первоначальный угол кантования металла кантующими роликами определяется по формуле

$$\varphi_n = \varphi \frac{L_0}{L}, \quad (4.48)$$

где  $\varphi$  – полный угол кантования;

$L$  – расстояние между клетями;

$L_0$  – расстояние между осями рабочих и кантующих валков.

Согласно расположению клеток в цеху расстояние между клетями 6 и 7  $L_0 = 6150$  мм. При установке в 6-ой клетки роликовой кантующей проводки RTC 10 расстояние между осями рабочих и кантующих валков будет  $L = 516$  мм.

Таким образом

$$\varphi_0 = 45 \frac{516}{6150} = 3,776^\circ = 3^\circ 47'.$$

Таким же образом произведен выбор типоразмеров валковых проводок для клеток 7-14 и определены их установочные параметры. Полученные данные для новой технологии в сравнении со существующей приведены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Типоразмеры валковых проводок и их установочные параметры для клеток 6-14

№ клетки	Существующая технология			Предлагаемая технология						
	Профиль, размеры, мм	Валковые проводки		Профиль, размеры, мм	Валковые проводки		Полный угол кантования φ, град.	Расстояние до следующей клетки L, мм	Расстояние между осями рабочих и кантующих валков L <sub>0</sub> , мм	Первоначальный угол кантования φ <sub>0</sub> , град.
		вводная	выводная		вводная	выводная				
6	Круг, 54	Моноблочная проводка 2E7L	Статическая проводка DS7	Квадрат, 48,5x48,5	Моноблочная проводка 2E7L	Роликовая кантующая проводка RTC10	45°	6150	516	3°47'
7	Овал, 28x76,8	Статическая проводка ES7	Статическая проводка DS5	Ромб, 41,4x61,8	Статическая проводка ES7	Роликовая кантующая проводка RTC10	26°44'	2200	516	6°16'
8	Круг, 39	2-роликовая входная проводка RE5F	Статическая проводка DS5	Квадрат, 38,8x38,8	2-роликовая входная проводка RE5F	Роликовая кантующая проводка RTC7	45°	2700	488	8°8'
9	Овал, 20,7x56,5	Статическая проводка ES5	Статическая проводка DS5	Ромб, 32,5x51,3	Статическая проводка ES5	Роликовая кантующая проводка RS3.5NO	24°43'	3400	623	4°32'
10	Круг, 33	2-роликовая входная проводка RE5F	Статическая проводка DS5	Квадрат, 30,9x30,9	2-роликовая входная проводка RE5F	Роликовая кантующая проводка RTC7	45°	4100	488	5°21'
11	Овал, 19,5x44,5	Статическая проводка SE4	Статическая проводка SD4	Ромб, 25,4x40,7	Статическая проводка SE4	Роликовая кантующая проводка RS3NLO	22°41'	4500	549	2°46'
12	Круг, 26,5	2-роликовая входная проводка RE4F	Статическая проводка SD4	Квадрат, 24,7x24,7	2-роликовая входная проводка RE4F	Роликовая кантующая проводка RS3NLO	45°	7500	549	3°18'
13	Овал, 17,8x39,9	Статическая проводка SE4	Статическая проводка SD4	Ромб, 19,7x32,4	Статическая проводка SE4	Роликовая кантующая проводка RS3NLO	20°31'	4500	549	2°30'
14	Круг, 22	2-роликовая входная проводка RE4F	Статическая проводка SD2K	Квадрат, 19,7x19,7	2-роликовая входная проводка RE4F	Роликовая кантующая проводка RS3NLO	45°	5000	549	4°56'

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены механические испытания и металлографические исследования образцов, полученных при экспериментальной прокатке на стане «Дуо-200/150» (Приложение А), и установлены закономерности формирования структуры и свойств металла при прокатке катанки по новой технологии.

2. Установлено, что при прокатке катанки по новой технологии за счет многократного действия знакопеременной сдвиговой деформации происходит равномерное измельчение зерен по всему сечению заготовки, как в поперечном, так и в продольном сечениях.

3. Установлено, что в образцах катанки при прокатке по новой технологии получается более равномерно распределенный цементит в виде дробленных коротких стержней, в то время как при прокатке по традиционной технологии цементит в перлитной колонии катанки имеет пластинчатое строение.

4. Установлено, что особенность строения цементита в перлитной колонии при прокатке по новой технологии обусловлена формированием более мелких аустенитных зерен под действием значительных сдвиговых компонент деформаций.

5. Установлено, что уровни механических свойств катанки, полученной по новой технологии, благоприятно влияет на технологию последующего волочения проволоки. Так более низкий уровень предела прочности обеспечивает снижения усилия, необходимого для протягивания проволоки в каждом переходе, а более высокий уровень относительного сужения приводит к сокращению общего количества промежуточных отжигов в процессе волочения.

6. Установлено, что при прокатке в предлагаемом ромбическом калибре происходит увеличение усилий прокатки по сравнению с традиционным ромбическим калибром, которое вызвано реализацией интенсивных пластических деформаций в металле за счет макросдвиговой деформации в поперечном направлении вследствие недиагонального расположения ромба в новом калибре. Такое увеличение энергосиловых параметров в ромбических калибрах, в конечном счете оправдывается получением таких свойств катанки, которые при последующем холодном волочении приводят к снижению суммарных энергетических, материальных и трудовых затрат.

7. Разработаны технологические режимы прокатки катанки диаметром 18 мм из малоуглеродистой стали Ст3 с использованием новой системы калибров «ромб-квадрат» для непрерывного сортопрокатного стана 320 АО «АрселорМиттал Темиртау».

8. По данному этапу научно-исследовательской работы в 2014 году опубликованы следующие научные работы (приложение Б):

- Найзабеков А.Б., Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Быхин М.Б. О реализации интенсивных пластических деформаций при прокатке в калибрах. //

Международный научный журнал «Наука и мир» (Россия), №10(14), 2014, Том 1. С. 45-49.

- Найзабеков А.Б., Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Кукимов М.Ж., Магжанов М.К. Определение и анализ энергосиловых параметров нового процесса прокатки катанки // Материалы X Международной научно-практической конференции «НОВИНАТА ЗА НАПРЕДНАЛИ НАУКА - 2014», 17 - 25 мая 2014 г. Том 32. Технологии. Здание и архитектура. София (Болгария), «БялГРАД-БГ» ООД. С. 3-7.

- Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Найзабеков А.Б. Исследование энергосиловых параметров нового способа горячей сортовой прокатки. // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета, №4(7), 2014.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Пашинская Е.Г. Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации / Е.Г. Пашинская. – Донецк: изд-во «Вебер» (Донецкое отделение), 2009. - 352 с.

2 Эволюция структуры и свойств сталей 20 и 45 в процессе равноканального углового прессования в зависимости от предварительной обработки / М.В. Чукин, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова и др. // Литейные процессы: Межрегион, сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. Вып. 7. С. 115-123.

3 Грудев, А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев . – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001 . – 280 с.

4 Теория прокатки. Справочник. / Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. М.: Металлургия, 1982. - 335 с.

5 Найзабеков А.Б., Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Кукимов М.Ж., Магжанов М.К. Определение и анализ энергосиловых параметров нового процесса прокатки катанки // Материалы X Международной научно-практической конференции «НОВИНАТА ЗА НАПРЕДНАЛИ НАУКА - 2014», 17 - 25 мая 2014 г. Том 32. Технологии. Здание и архитектура. София (Болгария), «БялГРАД-БГ» ООД. С. 3-7.

6 Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Найзабеков А.Б. Исследование энергосиловых параметров нового способа горячей сортовой прокатки. // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета, №4(7), 2014.

7 Смирнов В.К., Шилов Ю.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. -М.: Металлургия, 1987. - 368 с.

8 Чекмарев А.П., Чернобривенко Ю.С. Роликовая арматура прокатных станов. М.: Металлургия. 1964. 260 с.

9 Федин В.П., Грицук Н.Ф. Валковая арматура сортовых станов. М.: Металлургия. 1975. 216 с.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

1 Найзабеков А.Б., Быхин М.Б. Ногаев К.А., Быхин Б.Б. О реализации интенсивных пластических деформаций при прокатке в системе калибров «ромб-квадрат». Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии». Том 2. г. Темиртау, КГИУ. 11-12 октября 2013 г., с.50-58.

2 Найзабеков А.Б., Быхин Б.Б. Ногаев К.А., Лежнев С.Н., Кукимов М.Ж., Нурдаулетова М.А., Магжанов М.К. Способ реализации интенсивной пластической деформации в новой системе калибров «ромб– квадрат» и разработка калибровки валков, валковой арматуры для прокатки катанки. Сборник научных трудов VII Международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», г. Екатеринбург, УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. 26-30 ноября 2013 г.

3 Найзабеков А.Б., Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Кукимов М.Ж. Разработка конструкции проводковой арматуры для калибров валков, реализующих интенсивную пластическую деформацию (ИПД) металла. Республиканский научный журнал «Вестник Карагандинского Государственного индустриального университета», №1, 2013 г., с. 16-19.

4 Найзабеков А.Б., Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Кукимов М.Ж. Разработка конструкции проводковой арматуры для калибров валков, реализующих интенсивную пластическую деформацию (ИПД) металла. Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии». Том 1. г. Темиртау, КГИУ. 11-12 октября 2013 год, с.95-98.

5 Быхин Б.Б., Лежнев С.Н., Нурдаулетова М.А. Микроструктура катанки из малоуглеродистой стали Ст3. Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии». Том 2. г. Темиртау, КГИУ. 11-12 октября 2013 г., с.25-31.

6 Найзабеков А.Б., Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Быхин М.Б. О реализации интенсивных пластических деформаций при прокатке в калибрах. // Международный научный журнал «Наука и мир» (Россия), №10(14), 2014, Том 1. С. 45-49.

7 Найзабеков А.Б., Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Кукимов М.Ж., Магжанов М.К. Определение и анализ энергосиловых параметров нового процесса прокатки катанки // Материалы X Международной научно-практической конференции «НОВИНАТА ЗА НАПРЕДНАЛИ НАУКА - 2014», 17 - 25 мая 2014 г. Том 32. Технологии. Здание и архитектура. София (Болгария), «БялГРАД-БГ» ООД. С. 3-7.

8 Быхин Б.Б., Ногаев К.А., Найзабеков А.Б. Исследование энергосиловых параметров нового способа горячей сортовой прокатки. // Вестник Карагандинского государственного индустриального университета, №4(7), 2014.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ



Рисунок А.1 – Экспериментальный полупромышленный прокатный стан «Дуо-200/150»



Рисунок А.2 – Подготовки тензометрической станции к измерению усилий прокатки

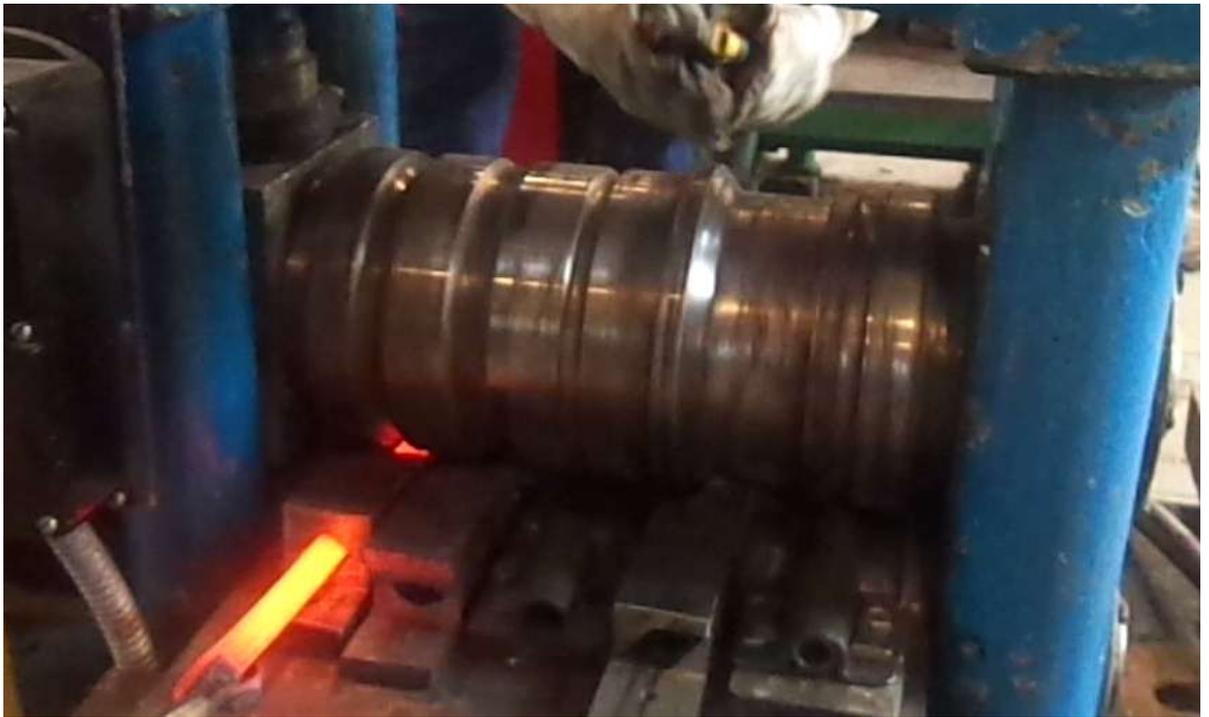


Рисунок А.3 – Проведение экспериментальной прокатки по новой технологии



Рисунок А.4 – Темплеты профилей, полученных из соответствующих калибров по ходу прокатки по новой технологии

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Приложение 1.4

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН РАБОТ

По договору № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2014 года

**РГП на ПХВ «Карагандинский государственный  
индустриальный университет» МОН РК**

**1.1 По приоритету:** Глубокая переработка сырья и продукции.

**1.2 По подприоритету:** Технологии получения новых материалов.

**1.3 По теме:** Разработка и исследование инновационной технологии горячей прокатки для получения высококачественной катанки при минимальных материальных и энергетических затратах.

**1.4 Сумма проекта** 6666666 (шесть миллионов шестьсот шестьдесят шесть тысяч шестьсот шестьдесят шесть) тенге.

#### 2. Характеристика научно-технической продукции по квалификационным признакам и экономические показатели

**2.1 Направление работы:** Металлургия по направлению «Обработка металлов давлением».

**2.2 Область применения:** полученные высококачественные материалы будут использованы в отрасли машиностроения.

**2.3 Конечный конкретный результат:** будет получена новая ресурсосберегающая технология горячей прокатки катанки; опытный образец катанки; новая конструкция валков.

**2.4 Патентоспособность:** патентоспособен.

**2.5 Научно-технический уровень (новизна):** Получение новой технологии производства высококачественной катанки, на основе реализации интенсивной пластической деформации (ИПД) при горячей прокатке.

**2.6 Использование научно-технической продукции осуществляется:** Исполнителем.

**2.7 Вид использования результата научной и (или) научно-технической деятельности:** Полученные результаты будут рекомендованы к внедрению в прокатном производстве металлургических предприятий, в частности АО «АрселорМиттал Темиртау», Павлодарском филиале ТОО «Кастинг» и др., для производства катанки по новой технологии.

Шифр задания, этапа	Наименование работ по Договору и основные этапы его выполнения	Срок выполнения		Ожидаемый результат
		начало	окончание	
1	Подготовка и проведение механических испытаний	В течение года	В течение года	Будут определены механические свойства деформированных образцов.

2	Подготовка и проведение металлографических исследований	в течение года	в течение года	Будут проведены металлографические исследования с целью изучения эволюции микроструктуры.
3	Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований	в течение года	в течение года	Будут выявлены закономерности влияния новой системы калибровки валков и режимов прокатки на показатели качества катанки и энергосиловые параметры процесса.
4	Разработка технологических режимов прокатки	в течение года	в течение года	Будут разработаны научно обоснованные технологические режимы горячей прокатки, обеспечивающие получение высококачественной катанки, для применения в производстве
5	Подготовка годового отчета.	в течение года	в течение года	Годовой отчет.

От Заказчика:  
Заместитель председателя  
ГК «Комитет науки  
и техники» Министерства  
науки и науки РК

Тулешов А.К.



От Исполнителя:  
Ректор РГП на ПХВ «Карагандинский  
индустриальный  
МОИ РК»

Ибатов М.К.

